

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ -  
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

**Hornicko-geologická fakulta  
Institut hornického inženýrství a bezpečnosti**

**ZÁVISLOST VYSOKOTEPLOTNÍCH PARAMETRŮ KOKSU  
NA SLOŽENÍ A VLASTNOSTECH UHELNÉ VSÁZKY**

**DEPENDENCE OF HIGH-TEMPERATURE COKE  
PARAMETERS ON COAL CHARGE COMPOSITION AND  
QUALITIES**

diplomová práce

Autor:

Bc. Jaroslav Bochňák

Vedoucí diplomové práce:

doc.Ing.Ján Kret,CSc.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Hornicko-geologická fakulta  
Institut hornického inženýrství a bezpečnosti

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jaroslav Bochňák**  
Studijní program: N2111 Hornictví  
Studijní obor: 2101T008 Hornické inženýrství  
Téma: **Závislost vysokoteplotních parametrů koksu na složení a vlastnostech uhelné vsázky**  
**Dependence of high-temperature coke parameters on coal charge composition and qualities**

Zásady pro vypracování:

Úvod

1. Zpracování literární rešerše dané problematiky
  2. Charakteristické kvalitativní parametry koksu
  3. Moderní metody hodnocení jakostních parametrů uhlí
  4. Statistické zpracování vlivu vlastností uhlí na kvalitu koksu v provozních podmínkách OKK
  5. Návrh složení uhelné vsázky pro výrobu koksu
- Závěr

Rozsah práce: 30 - 35 stran, 3 - 5 grafických příloh.

Seznam doporučené odborné literatury:

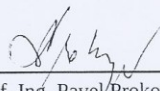
ROUBÍČEK, V., BUCHTELE, J.: *Chemie uhlí a jeho využití*. VŠB - TU Ostrava, 1996, ISBN 80-7078-406-7.  
KRET, J., BILIK, J. a kol.: *Moderní způsoby hodnocení jakosti vysokopecního koksu*. Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, 1991.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ján Kret, CSc.**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 30.04.2013

  
prof. Ing. Pavel Prokop, CSc.  
vedoucí institutu

  
prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.  
děkan fakulty

## **Prohlášení**

**Celou bakalářskou práci, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.**

**Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.**

**Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).**

**Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.**

**Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.**

**Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).**

**V Ostravě dne 30. 04. 2013**

**Jaroslav Bochňák**

## ANOTACE

Diplomová práce se zabývá vzájemnou závislostí mezi výsledným produktem, tedy koksem a jeho kvalitativními parametry a složením uhelné vsázky při přípravě vysokopecního a slévárenského koksu.

První část práce je zaměřena na studium odborné literatury a vysvětlením základních pochodů, které souvisí s procesem koksování. Následující část se věnuje sledováním nejdůležitějších kvalitativních vlastností koksu a jakostních zkoušek uhlí prováděných v laboratoři.

Experimentální část práce je zaměřena na sledování kvalitativních parametrů uhlí a koksu formou jednoduché lineární regrese v programu Statgraphic.

Závěrečná část obsahuje návrh uhelné vsázky pro výrobu vysokopecního a slévárenského koksu.

**Klíčová slova :** uhelná vsázka, vysokopecní koks, slévárenský koks, koksování, lineární regrese

## ANNOTATION

This dissertation dwells on contexture between final product, that's coke, and its qualitative parameters and coal mix composition for blast furnace and foundry coke making.

Thesis forepart is aimed on special literature study and fundamental processes explanation associated with coking; next part follows the most important coke properties and coal qualitative tests in-laboratory examining.

The experimental part is focused on coal and coke qualitative parameters monitoring by means of single linear regression in Statgraphic program.

In final part submits the draft of coal charge composition for blast furnace and foundry coke production.

**Keywords :** coal charge, blast fonace coke, foundry coke, coking, linear regression

Obsah:

<b>1.ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2.TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>2</b>
2.1.TVORBA KOKSU .....	2
2.2. PRŮBĚH KARBONIZACE UHLÍ .....	3
2.3. VLASTNOSTI VSÁZEK OVLIVŇUJÍCÍ TVORBU KOKSU.....	5
2.3.1. PŘÍPRAVA VSÁZKY NA UHELNÉ SLUŽBĚ ZÁVODU  KOKSOVNA SVOBODA .....	9
2.3.2. UHLÍ VHODNÉ PRO KOKSOVÁNÍ .....	12
2.4. DRUHY KOKSU .....	14
2.4.1. VYSOKOPECNÍ KOKS .....	15
2.4.2. SLÉVÁRENSKÝ KOKS.....	17
2.4.3. OTOPOVÝ KOKS .....	19
<b>3. CHARAKTERISTICKÉ KVALITATIVNÍ PARAMETRY .....</b>	<b>20</b>
<b>KOKSU .....</b>	<b>20</b>
3.1. CHEMICKÉ VLASTNOSTI KOKSU .....	22
3.2. FYZIKÁLNĚ CHEMICKÉ VLASTNOSTI KOKSU.....	24
3.3. FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOKSU .....	33
<b>4. MODERNÍ METODY HODNOCENÍ JAKOSTNÍCH.....</b>	<b>35</b>
<b>PARAMETRŮ UHLÍ .....</b>	<b>35</b>
4.1.1.STANOVENÍ VEŠKERÉ VODY .....	36
4.1.2. STANOVENÍ ANALYTICKÉ VODY .....	36
4.1.3. STANOVENÍ PRCHAVÉ HOŘLAVINY .....	37
4.1.4. STANOVENÍ POPELA .....	38
4.1.5. STANOVENÍ SÍRY .....	40
<b>5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>41</b>
5.1. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VLIVU VLASTNOSTÍ UHLÍ .....	41
NA KVALITU KOKSU V PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH OKK.....	41
5.1. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ HODNOT VYSOKOPECNÍHO KOKSU .....	41
5.2. VÝSLEDKY JEDNODUCHÉ LINEÁRNÍ REGRESE UHLÍ A KOKSU VK .....	44
5.2.1. LINEÁRNÍ REGRESE CRI NA CSR.....	44

5.2.2. LINEÁRNÍ REGRESE CSR – OBSAH POPELA .....	45
5.2.3. LINEÁRNÍ REGRESE CSR – OBSAH PRCHAVÝCH LÁTEK.....	46
5.3. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ HODNOT SLÉVÁRENSKÉHO KOKSU.....	48
5.4. VÝSLEDKY JEDNODUCHÉ LINEÁRNÍ REGRESE UHLÍ A KOKSU SLK.....	50
5.4.1. LINEÁRNÍ REGRESE M 40 NA M 10.....	50
5.4.2. LINEÁRNÍ REGRESE M 40 – OBSAH PRCHAVÝCH LÁTEK .....	51
<b>6. NÁVRH SLOŽENÍ UHELNÉ VSÁZKY PRO VÝROBU .....</b>	<b>53</b>
<b>KOKSU .....</b>	<b>53</b>
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

OKK	- ostravsko-karvinské koksovny
CRI	- index reaktivity koksu
CSR	- síla koksu po reakci
M 40	- otěrová pevnost koksu
M 10	- otěr
VK	- vysokopecní koks
SLK	- slévárenský koks
NSC	- Nippon Sreel Corporation
$R_{ov}$	- střední světelná odraznost vitrinitu
$W_t$	- veškerá voda
$W^a$	- analytická voda
$V^{daf}$	- obsah prchavých látek
$A^d$	- obsah popela
$S^d$	- stanovení síry
TGA	- termogravimetrický analyzátor
ČSN	- česká (československá) technická státní norma

## 1. ÚVOD

Výroba surového železa a oceli úzce souvisí s výrobou koksu. Koksování, při kterém dochází k přeměně uhlí působením tepla za nepřístupu vzduchu na koks (proces vysokoteplotní karbonizace) je nejdůležitějším způsobem zušlechťování uhlí. Jako vedlejší produkty vznikají i další cenné chemické produkty jako dehet, síran amonný, benzol atd., jejichž získáváním se zlevňuje výroba koksu. Hlavními spotřebiteli koksu jsou pak hutě a slévárny, které používají koks s určitými vlastnostmi a velikostními parametry.

Koksárenský průmysl je rozvíjen zejména v zemích s potřebnými zásobami koksárenských uhlí. Celkově je však tento rozvoj poznamenán značnými změnami ve struktuře energetické základny průmyslově vyspělých zemí, vývojem nových technologií i využíváním netradičních zdrojů energie.[1]

Cílem diplomové práce je stanovit hlavní složení a jakostní parametry uhlí, které nám ovlivňují výslednou kvalitu koksu. V experimentální části jsou pak v programu Statgraphic formou jednoduché lineární regrese vyhodnoceny jednotlivé parametry ovlivňující kvalitu vysokopecního a slévárenského koksu.

Pro vysokopecní koks byly jako hlavní kvalitativní parametry použity parametry indexu reaktivity koksu (CRI), pevnosti koksu po reakci s  $\text{CO}_2$  (CSR), parametr obsahu popela a obsahu prchavé hořlaviny. U slévárenského koksu byly použity jako kvalitativní parametry procentuální otěrová pevnost koksu M 40, M 10 a obsah prchavých látek. Závěrečná část práce je věnována návrhu uhelné vsázky pro vysokopecní a slévárenský koks.



## 2. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část diplomové práce seznamuje s hlavními pochody, které úzce souvisí s výrobou koksu. Jedná se především o vlastnosti vsázek ovlivňující tvorbu koksu, určení typu uhlí vhodných pro koksování a průběhu karbonizace uhlí.

### 2.1. Tvorba koksu

Některé druhy černých uhlí mají koksovací vlastnosti. Projevují se jako změny uhelné hmoty při teplotách 350 – 500 °C, kdy při zahřívání za nepřístupu vzduchu (karbonizaci) uhlí nejdříve měkne a později vzniká pevný a spečený koksový zbytek.[9]

Karbonizace uhlí záleží v tom že se uhlí zahřívá v uzavřených prostorách za nepřístupu vzduchu. Pochody, které při tom probíhají jsou velmi složité. Při postupném zvyšování teploty se uhlí nejdříve vysušuje, při teplotách do 150 °C se vypaří i hygroskopická voda, při vyšších teplotách i krystalová voda popelovin, po případě i plyny okludované uhlím jako oxid uhličitý, metan a dusík. Při teplotách 250 až 300 °C nastává první rozklad uhelné hmoty za vzniku oxidu uhličitého, vody a sirovodíku, později se začíná odštěpovat oxid uhelnatý, metan a jiné uhlovodíky. Při teplotách 300 až 400 °C nastává pronikavější rozklad uhelné hmoty, kdy se vyvíjejí i ve větším množství dehtové páry, vyšší uhlovodíky nasycené i nenasycené. Při teplotách asi 350 až 450 °C se dostává uhlí do plastického stavu, jehož počátek leží tím výše, čím je uhlí více prouhelněno. Čpavek se začíná tvořit při teplotách od 400 do 450 °C, Asi při teplotě 500 °C je ukončeno odštěpování kapalných produktů vznikem polokoksu, který však obsahuje ještě značné množství vodíku, kyslíku a dusíku, které se odštěpují při dalším zvyšování teploty mezi 500 až 1100 °C za současně tvorby koksu. Při konečné teplotě asi 1000 až 1100 °C na niž se ohřeje náplň koksárenské pece, obsahuje hořlavina koksu asi jen 0,5% vodíku, asi 1% kyslíku, něco síry a dusíku a asi 96% uhlíku.

Při koksování vzniklé prchavé zplodiny rozkladu hořlaviny (vodní a dehtové páry i plyny) jsou odváděny stoupačkou do předlohy k dalšímu zpracování. Koks zůstává v peci a je po ukončeném koksování z pece vytlačen a ochlazen vodou.[2]

Podle teploty zahřívání rozdělujeme karbonizaci :

- vysokotepelná karbonizace (koksování za teplot kolem 1000 °C)
- nízkotepelná karbonizace (polokoksování za teplot 500 až 600 °C)

Pro výrobu hutnického koksu má hlavní význam koksování černých uhlí za vysokých teplot. Při procesu koksování zbavujeme uhelnou hmotu tepelným rozkladem prchavých součástí.[2]

## 2.2. Průběh karbonizace uhlí

V průběhu karbonizace probíhají složité fyzikálně chemické reakce, v jejichž důsledku se uvolňují paroplynové produkty a vzniká koks. Současně probíhají fyzikální procesy, které ovlivňují proces tvorby koksu.

První stadium – ohřev uhlí do 200 °C, uvolňují se nízkomolární plyny  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  aj.) a snižuje se zastoupení skupin  $\text{OH}$  a  $\text{COOH}$ .

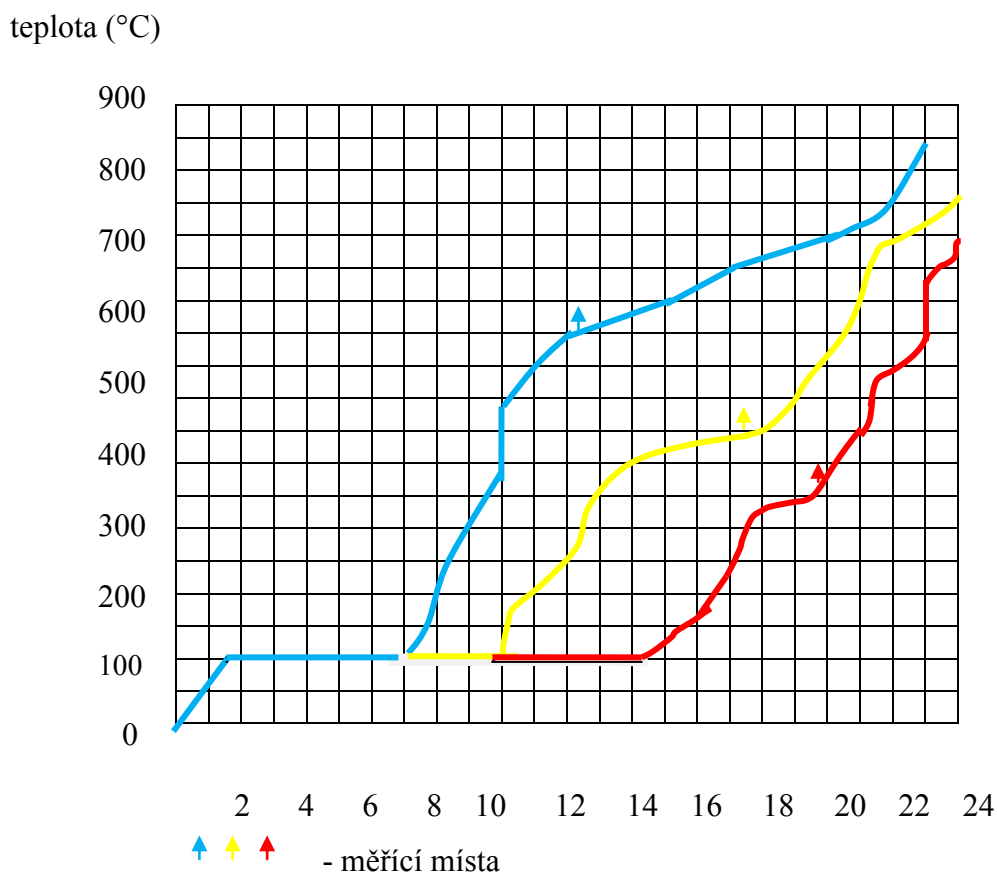
Druhé stadium - teploty od 200 až 350 °C, nedochází k podstatnému úbytku hmoty, tepelné vibrace napomáhají dalšímu odštěpování  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  a  $\text{H}_2$ .

Třetí stadium - od 350 do 450 °C dochází k nevýraznému úbytku hmoty a mění se agregátní stav hmoty, kdy přechází v plastický stav a dochází k uvolňování dehtu.

Čtvrté stadium - 450 až 550 °C, dochází k prudkému úbytku hmoty zejména v důsledku uvolňování dehtu. Dochází k tunutí plastické fáze, roste index aromatizace (poměr  $\text{C} : \text{H}$ ), pokračuje uvolňování nízkomolekulárních plynů.

Páte stadium – 550 až 990 °C, je doprovázeno postupným úbytkem hmoty unikajícími nízkomolárními plyny, zejména vodíkem. V důsledku dehydrogenace se tvoří aktivní centra, dochází k asociaci (zhuštění) tuhé fáze. Stále se zvyšuje poměr C : H.

Schéma č. 1 – Průběh teplot v koksovací komoře



čas (h)

Z hlediska růstu teploty v objemu koksovací komory lze pozorovat, že původně homogenní vsázka se stává značně nehomogenní jak z hlediska hmoty samotné (kondenzace vlhkosti ve středové oblasti komory) a také z hlediska přenosu tepla vsázkou. Mění se podstatně i teplotní gradient v oblastech s různou vzdáleností od topné stěny.[1]

## 2.3. Vlastnosti vsázek ovlivňující tvorbu koksu

Uhelná vsázka je směs komponentů uhlí vhodných pro koksování, které se skládají obvykle ze tří a více druhů uhlí, jsou různě procentuálně dávkovány a tvoří základní směs pro výrobu vysokopecního příp. slévárenského koksu. Příprava vsázky probíhá na uhelné službě.

Výběr uhlí a složení směsi jsou hlavními faktory ovlivňující vlastnosti koksu (fyzikální a chemické). [12]

Základní koksovací vlastnosti uhlí :

- spékavost
- plasticita
- puchnutí
- rozpínavost
- smršťování

**Spékavostí** nazýváme schopnost rozemletého uhlí spéci se při koksování v pevný koksový zbytek. Uhlí se spéká tím, že jeho část přechází do plastického stavu a smáčí ostatní netající uhelné složky. Dobrá spékavost je podmíněna plasticitou a je podmínkou pro vznik velkých a pevných kusů koksu.

**Plasticita** uhlí přichází při zahřívání mezi 300 až 400 °C a je omezena na určitou oblast teplot. Při postupném zahřívání začíná uhlí měknout při určité teplotě, kterou nazýváme jako počátek plasticity a končí při určité teplotě, kterou označujeme jako konec plasticity. Konec plasticity je dán tvorbou polokoksu. Šíře plasticity je u jednotlivých druhů uhlí jiná. Plasticita souvisí se spékavostí uhlí a umožňuje stmelení cizích zrněk tvárnou uhelnou hmotou. Plasticitu uhlí můžeme tedy označit jako příčinu a spékavost jako následek plasticity.

**Puchnutí** je vlastnost uhlí zvyšovat při karbonizaci svůj objem bez toho, že by působila tlakem na překážku. Je způsobeno tím, že uhlí při teplotě kolem 400 °C měkne, přechází do plastického stavu a se současným vývinem plynů uvnitř uhelné hmoty nabývá na objemu, čímž se tvořený koks stává pórovitým.

**Rozpínavost** je schopnost uhlí působit při puchnutí v omezeném prostoru určitým tlakem na stěny tohoto prostoru. Rozpínavost uhlí se ve značné míře vyrovnává smršťováním koksu, tedy v periodě kdy se mění polokoks v koks. Nejvíce se projevuje v první a poslední fázi koksování. V první fázi proto, že zvětšování objemu plastického pásma, které je blízko stěn není ještě vyrovnáno smrštěním koksu, protože v peci ještě není téměř žádný koks vytvořen. V poslední fázi může pak dojít k rozpínání proto, že obě plastická pásma postupují od stěn komory k jejímu středu, kde se setkají, čímž se vývoj plynů koncentruje na úzký prostor v uhelné náplni a je tedy prudký. Rozpínavost uhlí je nebezpečná zejména při pýchovaném provozu, kdy je uhelná vsázka značně zahuštěna a to i přes to, že je rozpínavost částečně tlumena mezerami mezi uhelným blokem a stěnami pecí.

Většina ostravsko-karvinských koksových uhlí se stává rozpínavou teprve ve stavu pýchovaném, tedy při zahuštění 950 až 1000 kg suchého uhlí na  $m^3$  objemu. Proto nemůže být čisté koksové uhlí v pýchovaném provozu koksováno samostatně, ale mícháno s druhy nerozpínavých uhlí.

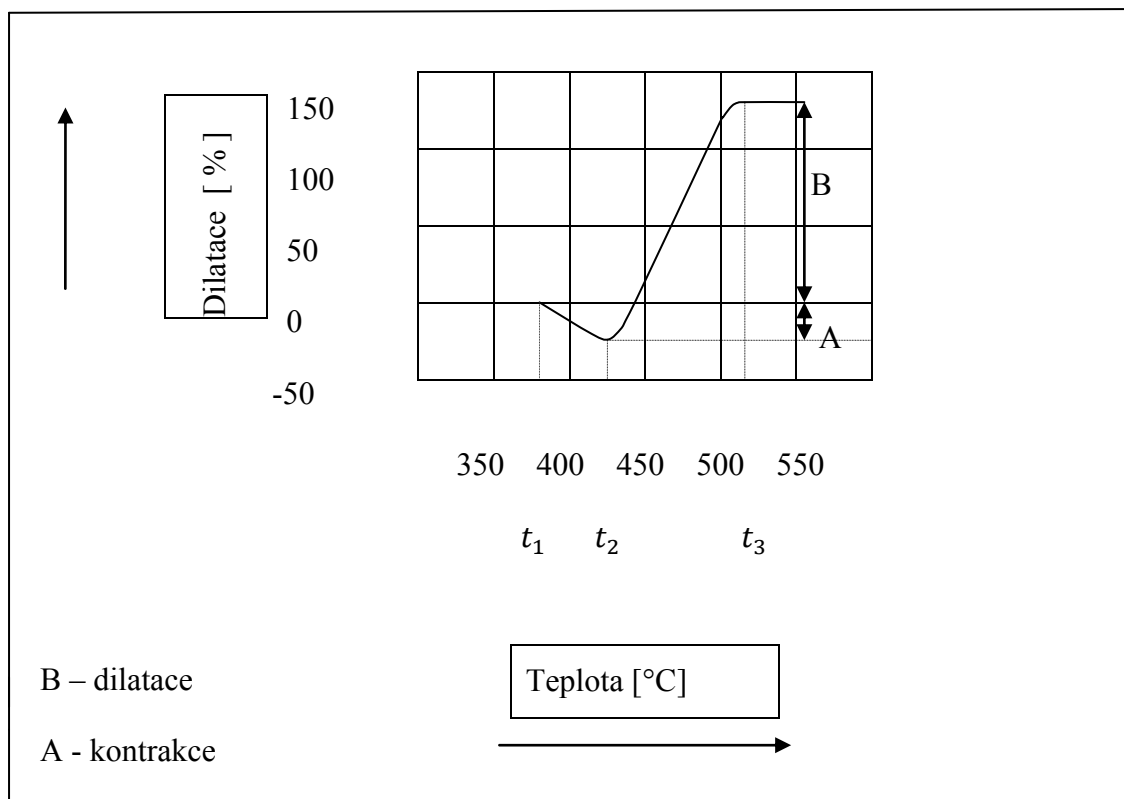
**Smršťování** koksu je důležitým jevem probíhajícím v poslední fázi koksování při teplotách nad 500 °C, tedy při teplotách při kterých přechází polokoks v koks. Smršťování vzniká pnutí tuhé koksové hmoty a vzniká převážně ve směru vodorovném, tedy v rovnoběžném směru s prostupem tepla. Uhlí plynová se smršťují více než uhlí koksová a žírná. Proto uhlí při stejné rychlosti prostupu tepla dává tenčí a štíhlejší kusy koksu, které se snadněji lámou a způsobují, že koks je drobnější. Smrštění a tím i kusovitost koksu je při jinak stejném uhlí závislá na rychlosti koksování. Kusovitost je tím menší, čím vyšší je koksovací teplota, tedy čím rychlejší je koksování. Proto se při výrobě slévárenského koksu, kde se požaduje hrubší koks, používá nižších koksovacích teplot a tedy i menších koksovacích rychlostí než při výrobě vysokopecního koksu, kde není kusovitost tak důležitá.[2]

Vlastnosti spolupůsobící na jakost vyrobeného koksu :

- koksovací vlastnosti - dilatace
  - index puchnutí
  - prchavé hořlaviny
- vlhkost
- zrnitost
- popelnatost

Dilatace je u různých druhů uhlí při zahřívání rozdílná. Nekoksující uhlí nemění při zahřívání svůj objem ani tvar, struktura zůstává stejná, plyny mohou nerušeně unikat. Koksující uhlí mění svůj objem vlivem měknutí, dalším zvyšováním teploty nastává zvětšování objemu plastické hmoty.

Schéma č. 2 – Základní typ dilatometrické křivky



Index puchnutí je francouzská metoda M 11 001 zjišťující puchnutí uhlí. Podstata zkoušky spočívá v tom, že se vzorek uhlí zahřívá v kelímku určité formy a profil koksového koláčku z tohoto kelímku se srovnává s obrysy standartních norem (normalizovaných tvarů), které jsou číslovány od 1 do 9 ve stupnici s polovičními čísly, takže je celkem 17 normalizovaných tvarů.

Tabulka č.1 *Označení uhlí podle indexu puchnutí*

Číslo kódu	Index puchnutí	Označení koksovateľnosti
0	0 - ½	nekoksující
1	1 - 2	slabě koksující
2	2½ - 4	středně koksující
3	4½ - 9	silně koksující

Obsah prchavé hořlaviny zjišťujeme kelímkovou koksovací zkouškou, která se provádí z rozdílu naváženého vzorku uhlí a váhy pevného zbytku a vyjadřuje se ve váhových procentech, vztažených buď na suché uhlí nebo přepočtených na hořlavinu uhlí. Zahřejeme-li malý vzorek rozemletého uhlí v uzavřeném kelímku náhle na teplotu asi 850 °C, unikne z uhlí určitý prchavý podíl hořlaviny ve formě plynné a v kelímku zbude neprchavý podíl, zvaný tuhým zbytkem neboli koksem. Odloučením prchavé hořlaviny v uhlí při vysokých teplotách až na malý zbytek (cca 1 – 1,5 %  $V^{daf}$ ) se tuhá hmota zpevňuje a vzniká vysokoteplotní koks.

Vlhkost upraveného (praného) koksárenského uhlí závisí na dokonalosti úpravy, na zrnitosti a odvodňovací době uhlí, popř. na použití mechanických nebo i termických způsobů odvodňování. Dobře odvodněné uhlí jemnozrnné prané uhlí (pod 10 mm) obsahuje 8 až 10 % vody, hrubozrnné uhlí nad 10 mm asi 5 % vody.

Při sypném provozu je optimální obsah vody 6 až 8 %, pýchovaný provoz vyžaduje poněkud vyšší obsah vlhkosti (10,5 – 12,5 %) kvůli soudržnosti pýchovaného bloku uhlí.

Zrnitost pro pýchovaný provoz má být pro dokonalé promíšení všech typů uhlí vsázky v průměru 90 % zrn menších než 3 mm. Zrnitost ovlivňuje sypnou hustotu i při sypném provozu, kde se mele většinou na zrna ve velikosti 80 až 85 % pod 3mm.[2]

Vliv popelnatosti koksovací vsázky se projevuje zejména při extrémním obsahu, protože dochází k rapidnímu zhoršení základní koksotvorné schopnosti uhlí.

Dávkování a míchání vsázkové směsi musí být přesné a účinné, jinak se plně nevyužije koksovacích vlastností a vzniklý koks má nerovnoměrnou jakost.

Vznik kvalitního koksu je vedle kvality vsázky podmíněn taky rychlostí karbonizace, neboli přenosu tepla. Rychlost přenosu tepla obecně závisí na šířce komory, hustotě vsázky a vlhkosti.[1]

### **2.3.1. Příprava vsázky na uhelné službě závodu Koksovna Svoboda**

Uhelná služba připravuje vsázku pro koksové baterie a obsahuje následující uzly :

- zavážení druhových zásobníků
- příprava vsázky
  - vynášení druhových zásobníků
  - míchání uhlí a koksového prachu
  - zavážení mlýnice



- mletí uhelné vsázky
- skládka koksového prachu
- dopravní mosty
- uhelné věže

Zpracovávané suroviny :

- prané černé uhlí vhodné pro koksování
  - zrnitost 0 – 80 mm
  - obsah vody 6 – 12 %
  - obsah popela 4 – 10 %
  - obsah prchavé hořlaviny 18 – 35 %
- jemný koksový prach
  - suchý z odprášení 0 – 0,2 mm
  - suchý mletý 0 – 0,1 mm
- tenzid (povrchově aktivní látka ve formě saponátu)
- ostřídlo (přídavek do vsázky 10-20%)

Jedná se o bezodpadovou technologii přípravy vsázky.

Prané uhlí dovážené ve vagónech a skládané do dvou zásobníků s kapacitou 750 t na každé straně (15 vagónů) je odtěžováno z hloubkového zásobníku vyhrabovacím zařízením a pomocí pásových dopravníků 502 - 507 je zaváženo do jednotlivých druhových zásobníků podle druhu uhlí. V těchto zásobnících je uskladňováno uhlí pro potřebu přípravy vsázky. Zásobníků je 22 s kapacitou 750 tun z toho čtyři slouží pro koksový prach (zásobníky č. 529,530, 539, 541) a zbytek pro prané uhlí (č. 520 – 529, 531 – 538 a 540). Z druhových zásobníků je pak podle zvolené technologie přípravy vsázky vzhledem ke koksovacím vlastnostem uhlí vynášeno pomocí vynašečů zásobníku z jednotlivých zásobníků a procentuálně dávkováno pásy nacházejícími se pod zásobníky a sběrnými pásy č. 542, 544, 545,546,549, 550 a mostovými pásy č.557, 559 a 561 dopraveno na mlýnici. Zde se soustavou pásů č.558,560,563 a 564 a přesypů dopraví do komor nad mlýny č.565 – 570 následovně pomocí podavačů do kladivových mlýnů, kde se vsázka rozele na požadovanou zrnitost (90% pod 3mm). Používá se 6 kladivových mlýnů typu 2145 výrobce PSP Přerov s výkonem 400 kW. Pomletá vsázka se zvlhčí vodou (10,5 – 12 %) a soustavou pásů č. 571 – 574, 576 a 579 je dopravena do míchačky uhlí Forberg F 2500, kde se homogenizuje. Pro výrobu slévárenského koksu se navíc jako ostřídlo přidává do směsi jemný koksový prach, který je do zásobníků přiváděn ze sousední budovy koksomletí nebo z autocisteren pomocí pseudopravy. Koksový prach se míchá s uhlím a společně homogenizuje v míchačce uhlí Forberg F 1000, kde je dále zkrápěn vodou a tenzidem. Po řádném rozemletí v kladivových mlýnech a homogenizování ve společné míchačce uhlí Forberg F 2500 je takto připravená směs dopravena pásovými dopravníky 581, 600, 601, 603, 607, 608, 609, 610 a 611 do uhelných věží, která slouží pro potřebu koksárenských baterií, které směs odebírají do zásobníku na výtlačném a pěchovacím stroji.

Řídící činnost na uhelné službě je vykonávána na velínu, prašnost v prostorách přípravy vsázky a mlýnice je eliminována odprašovacím zařízením typu MHK6, zkrápění uhlí a koksového prachu v míchačkách probíhá přes automat Simatic S7, používá se dvou kompresorů HAFI typ VSM 01, pásové dopravníky jsou šířky 800 – 1400 mm, výrobce Transporta Chrudim.[13]

### 2.3.2. Uhlí vhodné pro koksování

Uhlí používané pro výrobu koksu musí být předem zbaveno kamení (hlušin), nelze ho použít ve stavu v jakém bylo vytěženo. Množství popela v jednotlivých druzích uhlí se zmenšuje v úpravkách neboli prádlech. Hlušina se odváží na odvaly (haldy) Nespalitelné součásti jsou přítomny v uhelných slojích ve formě prorostlin, proplátek nebo formou průvodních hornin, které byly do uhlí přimíšeny při jeho dobývání.

Tvoří podstatu tzv. popelovin v uhlí, které snižují výhřevnost a upotřebitelnost uhlí, odstraňují se rozdruzováním neboli praním uhlí. Čisté (prané) uhlí se dopravuje do koksoven.

Protože černého uhlí s výbornými vlastnostmi pro koksování je málo a je velmi drahý, musí se koks vyrábět také z uhlí horší jakosti. Aby se udržela rovnoměrná jakost koksu, musí se uhlí řádně homogenizovat, rozemlít v mlýnech, přesně nadávkovat z druhových zásobníků, v nichž jsou odděleně uloženy jednotlivé druhy uhlí a dále pak řádně promíchat v míchačkách.[8]

Nejlepší koksovací schopnost, tj. tvorbu pevného a dobře spečeného zbytku po koksování má uhlí koksové, od něhož směrem k antracitu i směrem k uhlí pálavému spékavosti postupně ubývá.

Druhy černého uhlí :

Antracit

Antracitové uhlí

Koksové uhlí

Žírné uhlí

Plynové uhlí

Pálavé uhlí

**Antracit** je výborným palivem vzhledem ke svému malému obsahu prchavých látek (pod 8 %) hoří krátkým, nesvítivým a nečadivým plamenem. V zemích bohatých na antracit je možno antracitů s nízkým obsahem prchavých látek používat i jako paliva pro vysoké pece, také se může používat jako přísada do koksárenské směsi, kde působí jako ostřídlo. U nás se netěží.

**Antracitové uhlí** s obsahem prchavých látek 8 až 17 % hoří krátkým plamenem, je velmi dobrým a výhřevným uhlím vzhledem ke svému vysokému stupni prouhelnění. Čisté antracitové uhlí je nespékavé a není proto vhodné pro samostatné koksování, je však někdy vhodné jako přísada k některým uhlím, protože je samo uhlím nespékavým.

**Koksové uhlí** s obsahem prchavé hořlaviny 17 až 26% je nejlépe spékavým a proto je také naším nejvýznamnějším druhem černého uhlí. Při koksování dává koks nejlepší jakosti, velmi pevný a hutný. Protože je z hlediska koksárenského naším nejčistším druhem uhlí, nekoksuje se nikdy samostatně, ale používá se ho jako přísady k uhlím méně spékavým. Jeho poměrně malá přísada k uhlím mladším zejména plynovým zlepšuje podstatně vlastnosti vyrobeného koksu.

**Žírné uhlí** s obsahem prchavé hořlaviny 26 až 33% je rovněž velmi dobrým koksárenským uhlím, dávajícím zpravidla i při samostatném koksování koks velmi dobré jakosti. Jeho přidavkem k uhlím mladším lze značně zlepšit jakost koksu.

**Plynové uhlí** je rozděleno do dvou podskupin, lesklé s obsahem 32 až 38% prchavé hořlaviny a matné s obsahem nad 35% prchavé hořlaviny. Plynové uhlí hoří delším plamenem, při karbonizaci dává koks drobnější a méně pevný, a proto není vhodný jako samostatně koksující složka pro výrobu jakostního hutnického koksu, vyžaduje pro tento účel určitý určitý přírůstek uhlí koksového nebo žírného. Lesklé plynové uhlí je často ve směsi s pálavým uhlím velmi dobrým plynárenským uhlím, dávajícím při odplynování dostatek plynu a koks vyhovující účelům požadovaným od plynárenského koksu.

**Pálavé uhlí** zvané dříve uhlím plamenným je nejméně prouhelněným druhem černého uhlí. Obsahuje více než 35% prchavé hořlaviny a hoří dlouhým plamenem. Dělí se na tři podskupiny lišící se zejména svým obsahem vody a kyslíku. [2]

## 2.4. Druhy koksu

Koks je kvantitativně nejdůležitějším výrobkem koksoven. Používá se především vysokopecního a slévárenského koksu. Na jakosti vysokopecního koksu závisí výkon a provoz vysokých pecí a také vlastnosti surového železa. Proto jsou požadavky na jakost koksu vyráběného v koksovnách podřízeny především požadavkům metalurgie.

Koks má zpravidla pravidelný tvar a skládá se z kusů, jejichž největší délka dosahuje až téměř poloviční šířky komory, tedy délky 180-až 230 mm. Tvar jednotlivých kusů koksu bývá různý a závisí na druhu uhlí, rychlosti koksování a šířce komory. Koks vyrobený například z plynového uhlí a v komorách střední šířky (asi 450 mm) má někdy podlouhlý tvar, kdy délka kusů může přesahovat i trojnásobně jejich šířku. Takový koks bývá méně pevný, podlouhlé kusy se při dopravě snadno lámou na menší kusy s příslušným množstvím utvořeného hrášku a prachu. Podle toho z jakého druhu uhlí a za jakých podmínek byl koks vyroben, mají jednotlivé kusy větší nebo menší počet trhlin. Vnitřní struktura koksu je buničitá s mnoha menšími nebo většími póry. Barva a lesk jsou závislé na jeho grafitaci. U koksu slabě grafitických je barva obvykle černošedá, u silně grafitických až stříbrošedá. Stupeň grafitace závisí na druhu uhlí, rychlosti koksování, konečné teplotě v komorách, odstavné době a krakovacích pochodech uhlovodíků během koksování.[2]

Tabulka č.2 Charakteristické znaky druhů koksu

Druh	Zrna(mm)	Přib.výnos (celk.)	$W_r^t$ (%)	$A^d$ (%)	$V^{daf}$ (%)	Podsít.(%)
Slévár. I.	nad 90	40 až 45	3- 4	11,5	1,3	15
Slévár. II.	60 až 90	20 až 25	5 - 7	11,5	1,3	10
Kusový	nad 80	0	3 - 4	12,0	1,3	15
Vysokopecní	nad 40	65 až 75	3,5- 4,5	12,0	1,3	10
Kostka	60 až 80	0 až 3	7 - 8	12,0	1,3	15
Ořech 1	40 až 60	9 až 14	9 - 12	12,0	1,3	10
Ořech 2	20 až 40	7 až 10	12 - 15	12,0	1,5	10
Hrášek	10 až 20	1,5 až 4	15 - 18	12,5	2,0	5 až 8
Prach	pod 10	4 až 6	17 - 20	13,0	2,5	-

[9]

Druhy koksu :

- koks metalurgický - vysokopecní  
- slévárenský
- koks pro ostatní účely (otopový)

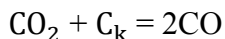
### 2.4.1. Vysokopecní koks

Vysokopecní koks je nejdražší složkou vysokopecní vsázky a při výrobě surového železa plní následující funkce :

- Funkce redukovala – poskytuje redukční prostředek (uhlík) pro redukci oxidů železa.
- Funkce paliva – poskytuje uhlík, jako zdroj tepla (jeho spalováním) pro pokrytí potřeb Tepla na ohřev a tavení materiálu, endotermických reakcí a na tepelné ztráty.
- Funkce nauhličovala – surové železo obsahuje přibližně 4,5 % uhlíku, který se rozpouští v železe z koksu.
- Funkce nosné kostry – střední a spodní část vysoké pece je vyplněna rozžhaveným koksem (1500 °C), který tvoří nosnou kostru (drenážní vrstvu, rošt). Kusy koksu v této části pece musí mít dostatečnou velikost (mezerovitost), aby byl umožněn průtok tekutého surového železa a strusky a v opačném směru průtok redukčních plynů.

Koks se sází do vysoké pece shora sazebnou a ukládá do vrstev střídavě s rudní vsázkou. Jednotlivé vrstvy spolu klesají směrem k nístěji. Zatímco v rudné vrstvě probíhá množství chemických, fyzikálních a teplotních procesů, v koksové vrstvě se až na růst teploty nic neděje (redukční atmosféra). Když koks klesne do spodní části pece (do nístěje), asi půl metru pod hranu sedla, má teplotu asi 1500 °C a přes výfučny se do něj fouká vysokopecní vítr – vzduch ohřátý na asi 1300 °C.

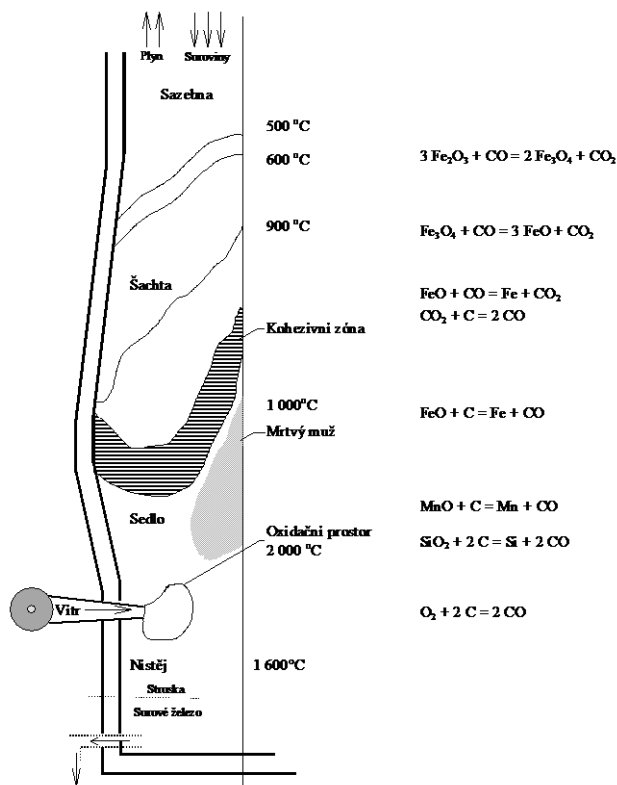
Výfučen bývá po obvodě vysoké pece v našich podmínkách okolo 24, před každou se vytvoří dutina (oxidační prostor) o délce asi 1,5 m ve které ve vířivém pohybu koks hoří. Veškerý uhlík koksu v oxidačních prostorech hoří na CO. Dokonalé hoření na  $\text{CO}_2$  je možné jen přechodně, protože vzniklý  $\text{CO}_2$  kamžitě reaguje s uhlíkem koksu na CO (Boudouardova reakce).



Tato reakce je silně endotermická. Boudouardova reakce může probíhat i mimo oxidační prostory, ale zdrojem  $\text{CO}_2$  tady není hoření uhlíku koksu, ale disociace zásaditých přísad a přímá redukce oxidů. Průběh této reakce mimo oxidační prostory je příčinou snižování velikosti kusů koksu (zplyňování pevného uhlíku koksu) tím snižování výrobnosti vysoké pece a její endotermický efekt zvyšuje měrnou spotřebu koksu. Reakce je proto nežádoucí.

Protože souhrn vlastností koksu, které určují rychlost Boudouardovy reakce je definován jako „reaktivita koksu“, je potřeba, aby její hodnota byla nízká.

Schéma č. 3 – Průběh teplot ve vysoké peci



Obrázek č. 1 – Vysokopecní koks – OKK, a.s.



Druhy vysokopecního koksu na závodě OKK Koksovny,a.s. :

- VK zrnitosti 25 - 90 mm
- VK zrnitosti 40 - 90 mm [3]

## 2.4.2. Slévárenský koks

U slévárenského koksu se klade důraz na nízký obsah síry, nízký obsah popela, malý obsah vody, vysokou výhřevnost, nízký obsah prchavé hořlaviny, dobrou mechanickou pevnost a kusovitost koksu. Požadavky na slévárenský koks jsou vyšší než u vysokopecního koksu. Slévárenský koks se u nás vyrábí většinou v pecích s pýchovaným provozem, dosahujeme tím zvýšené pevnosti a měrné váhy koksu. Na rozdíl od vysokopecního koksu probíhá koksování při teplotách asi o 50 až 100 °C nižších.



Dosáhne se tím vyžadované kusovitosti a celistvosti koksu, současně však vyššího procentuálního výtěžku slévárenského koksu z celkové výroby koksu.

Slévárenský koks má při spalování v kupolové peci uvolnit co nejvíce tepla a jeho spalování má být co nejdokonalejší za vzniku maximálního množství vzniká o 23 614 kJ více než při hoření na CO. Plyny unikající z pece mají mít co nejmenší obsah CO.

Slévárenský koks má mít nízkou reaktivnost, nízký obsah vody a popela, zejména však nízký obsah síry, který je ve slévárenském koksu obzvlášť škodlivý.[2]

Obrázek č. 2 – Slévárenský koks – OKK, a.s.



Druhy slévárenského koksu na závodě OKK Koksovny, a.s. :

- SLK I zrnitosti + 100 mm
- SLK II zrnitosti 70 - 130 mm
- SLK III zrnitosti 60 - 90 mm [3]

### 2.4.3. Otopový koks

Na ostatní druhy koksu, mezi které patří hlavně otopový a generátorový koks se nekladou kromě čistoty třídění, obsahu vody a popela zvláštní nároky. Otopový koks skládající se většinou z drobných tříděných druhů koksu a používaný pro otop v domácích kamnech a ústředních topeniích má mít obsah vody a popela (výhřevnost) odpovídající prodejní ceně těchto druhů.

U generátorového koksu používaného pro výrobu topného plynu v průmyslu (generátorový a vodní plyn) a plynu syntetického (vodík) se klade důraz zpravidla na vysoký bod tání popela, který snižuje škvárování koksu při vyšších teplotách v generátorech. Kvalita speciálních druhů koksu (koks pro výrobu karbidu) nebo exportního koksu se řídí zpravidla podle zvláštních úmluv.[2] Taktéž se koks používá v kovářských výhních (hrášek), při výrobě žáruvzdorných vláken. V posledním čase se používá jako sorpční materiál při čištění vod.

Obrázek č. 3 – Otopový koks – OKK, a.s.



Druhy otopového koksu na závodě OKK Koksovny, a.s. :

- otopová směs      ot.sm.      zrnitost nad 40 mm
- ořech 1              O1      zrnitost 40 – 60 mm
- ořech 2              O2      zrnitost 20 – 40 mm

### **3. CHARAKTERISTICKÉ KVALITATIVNÍ PARAMETRY KOKSU**

Kritéria, která slouží k hodnocení vysokopecního a slévárenského koksu, lze rozdělit do tří základních skupin zahrnujících chemické, fyzikální a fyzikálně chemické vlastnosti.

Důsledné rozčlenění vlastností koksu do uvedených skupin je obtížné, neboť záleží na hlediscích, podle nichž se daná vlastnost posuzuje.

Z chemického hlediska jsou důležité parametry :

- obsah neprchavého uhlíku
- obsah prchavých látek
- obsah popela
- obsah síry
- obsah fosforu

Z fyzikálních vlastností :

- mechanická pevnost
- trhlinatost
- kusovost
- rozptyl kusovosti
- tvar kusů
- stupeň grafitizace uhlíku
- pórovitost
- měrné teplo
- tepelná vodivost
- měrný elektrický odpor

Mezi fyzikálně chemické vlastnosti koksu patří :

- reaktivnost
- skutečná, zdánlivá a násypná měrná hmotnost
- hořlavost
- zápalná teplota
- výhřevnost

[6]

### 3.1. Chemické vlastnosti koksu

#### 1. Anorganické složky koksu

a) Voda v koksu snižuje podíl hořlaviny, a tím i výhřevnost koksu a je proto látkou balastní, nikoliv však vždy škodlivou.

Z technologického hlediska není mírný obsah vody ve vysokopecním koksu na závadu, protože koks se horkými plyny již ve vrchních částech vysoké pece vysušuje a vzniklá vodní pára přispívá k chlazení sazební a k menšímu podílu prachu unášeného vysokopecním plynem. Dobře a stejnoměrně uhašený a na odkládací plošině dokonale odpařený koks obsahuje asi 6 % vody. Protože koks vyklopený z hasícího vozu obsahuje zrna různých velikostí, není obsah vody rozdělen stejnoměrně v celém koksu, ale stoupá směrem od hrubých kusů k drobným. Je to způsobeno větším relativním povrchem drobných tříd koksu. Kusový koks nad 80 mm obsahuje obvykle 2 až 3 % vody, kostky asi 6 %, ořech II asi 12 %, hrášek asi 15 % a prach až 25 % vody. Veškerá voda je v koksu obsažena jako voda hrubá a zbylá. Koks je však málo hygroskopický, takže obsah zbylé vody je nepatrný. Hrubá voda se stanoví stejně jako při uhlí sušením vzorku na vzduchu, zbylá voda dosušováním vzorku v sušárně při teplotě asi 105 °C.

b) Podobně jako při uhlí vyjadřujeme i v koksu obsah popela  $A^d$ , tj. zbytku při dokonalém spálení koksu. Obsah popela bývá vyšší než obsah popelovin, protože při spalování oxidují vyredukované sloučeniny železa na oxidy. To způsobuje nepřesné stanovení obsahu kyslíku v koksu, který se zajišťuje při elementárním rozboru jako zbytek. Protože je obsah kyslíku v koksu malý, může být chyba dost velká. Vzhledem ke změně formě popelovin bývají rovněž popelové bilance nepřesné. Obsah popela v koksu snižuje obsah hořlaviny a tím i výhřevnost. Dobrý metalurgický koks má obsahovat asi 8 – 10 % popela.

U metalurgického koksu užitého ve vysoké peci velký obsah popela snižuje obsah uhlíku a vyžaduje větší množství vápence jako tavidla a tedy i použití více energie pro tvorbu strusky.

Bylo zjištěno, že zvýšení popela o 1 % způsobuje nárůst spotřeby koksu o 1,5 % a snížení efektivnosti procesu o 3-5 % .[11]

c) Síra v koksu je obsažena v uhlí převážně ve formě pyritu a zůstává při koksování asi ze dvou třetin v koksu, zbylá třetina pak vytvoří hlavně sulfan, který uniká s plynem. Pyrit se při karbonizaci rozkládá a síra, která zůstává v koksu je vázána jako siřník železnatý FeS. Organická síra přechází v siřníkovou. Při mokřém hašení koksu se část sulfidické síry oxiduje, úbytek síry v koksu, který tím vznikl je však nepatrný.

Při karbonizaci však probíhají sekundární reakce, které mají vliv na množství síry zbylé v koksu, takže obsah síry se může měnit. Mají na to vliv hlavně zásadité podíly popela, které mohou síru v koksu více nebo méně poutat. Při karbonizaci našich uhlí přecházejí asi dvě třetiny síry do koksu, takže při obvyklém 75 procentním výtěžku obsahuje koks zpravidla o něco méně síry než uhlí. Síra je v metalurgickém, zejména slévárenském koksu vždy škodlivou látkou. Ve vysokopecním provozu je vliv síry v koksu znatelný hlavně proto, že podíl síry přivedený koksem do vysoké pece, je značný a je asi 80 % veškeré síry přivedené vsázkou (koksem, rudou a vápencem)

d) Fosfor v koksu při koksování přechází z uhlí. Ostravské uhlí obsahuje pod 0,1 % fosforu. Pro výrobu některých druhů železa chudého fosforem požadován koks s minimálním obsahem fosforu 0,2 – 0,3 %.

## 2. Hořlavina koksu

a) Elementární složení hořlaviny koksu - Hořlavina koksu, která zbývá po odečtení vody a popelovin v koksu, obsahuje uhlík, vodík, kyslík, dusík a prchavou síru. Je-li koks dobře odplyněn, obsahuje hořlavina 96 – 98 % C, 0,3 až 0,8 %  $H_2$ , kolem 1 %  $N_2$ , 0,5 až 1,0 % prchavé S. Elementární složení hořlaviny koksu je závislé na konečné teplotě, dosažené při koksování uhlí v komoře. Čím vyšší je konečná teplota koksování, tím vyšší je obsah uhlíku a tím nižší obsah dusíku, vodíku a kyslíku v hořlavině koksu. Elementární složení hořlaviny je tedy ukazatelem odplynění. Analytické stanovení elementárního složení koksu se provádí stejně jako u uhlí.

b) Prchavé látky koksu – kdyby byl koks v koksárenské komoře naprosto dokonale odplyněn, neobsahoval by žádný podíl prchavé látky. Ve skutečnosti zbude v koksu vždy určitý podíl prchavé hořlaviny, jejíž množství závisí na konečné teplotě koksu v komoře a na odstavné době komory. Čím vyšší byla konečná teplota koksu a čím déle byl ponechán koks v komoře po jejím odstavení od předlohy, tím nižší je obsah prchavé hořlaviny v koksu. Dobře uzrálý koks vyrobený v moderních pecích s dinasovým materiálem obsahuje 0,7 až 1,2 % prchavé hořlaviny.

c) Spalné teplo a výhřevnost koksu jsou závislé na obsahu hořlaviny (obsahu popela a vody) a na složení hořlaviny. Protože však složení hořlaviny koksu kolísá za normálních podmínek jen v malých mezích, podléhá i spalné teplo hořlaviny jen malým změnám a je kolem 32000 kJ/kg. Vzhledem k malému obsahu vodíku je rozdíl mezi spalným teplem a výhřevností malý a je 80 až 160 kJ/kg. U dobře vyzrálého koksu jsou tedy spalné teplo a výhřevnost závislé prakticky jen na obsahu popela a vody. Za škodlivinu se považují i alkalické sloučeniny (Na, O,  $K_2O$ ) které několikanásobně zvyšují reaktivitu koksu.

Alkálie obsažené ve vysokopecních vsázkových materiálech a spolu s nimi dodávané do vysoké pece, jsou zdrojem vážných potíží v procesu výroby surového železa. Překročení přípustného obsahu alkálií ve vysokopecní vsázce na jednu tunu surového železa způsobuje zhoršení provozu a snížení výkonu vysokých pecí, pokles odolnosti koksu, podporuje zavěšování vsázky, vznik nasazenin a urychlení opotřebení žáruvzdorného obložení pece. Nelze jednoznačně stanovit hodnotu přípustného podílu alkálií ve vsázce. Je závislý hlavně na vysoké peci a jejím stavu a na podmínkách procesu [10].

## 3.2. Fyzikálně chemické vlastnosti koksu

Zkouška pevnosti a reaktivity koksu po reakci s  $CO_2$  - CSR – CRI (coke strength after reaction)

Je zkouška vyvinutá japonskou firmou NSC (Nippon Steel Corporation) pro určení pevnosti vysokopecního koksu po jeho reakci s  $CO_2$  (při vysokých teplotách) CSR. Současně se určuje hodnota reaktivity koksu CRI (coke reactivity index).

Metodika měření kvality koksu tedy nejlépe vystihuje jeho pravděpodobné chování ve vysoké peci, tj. působení pecních plynů při vysoké teplotě a postupném sestupu vsázky ve vysoké peci (mechanické namáhání). Určuje vlastnosti koksu ve spodní, tepelně nejvíce namáhavé části pece.

Protože vysokopecní koks je nejdražší palivo a jeho výroba významně přispívá ke znečišťování životního prostředí je v současnosti velmi výrazná snaha o náhradu koksu jiným palivem. Podle posledních informací je možno nahradit až polovinu koksu. Náhradní paliva (zemní plyn, olej, prachové uhlí) se injektují do vysoké pece s vysokopecním větrem přes výfučny. Jelikož se objem nedá měnit a z technologických důvodů musí objem „nosné kostry“ zůstat konstantní, (tato funkce se nedá nahradit plynným, tekutým ani práškovým materiálem), musí koks ve spodní části zůstat v pevném, kusovém stavu zhruba 2 krát tak dlouho, než při technologii jen s koksem. Při vysokých teplotách ( v nížeji) probíhá přímo redukce oxidů, která produkuje  $\text{CO}_2$  a další  $\text{CO}_2$  je produktem disociace přísad. Prodloužená doba setrvání pevného koksu v této oblasti znamená prodloužení doby Boudarovy reakce a významné zvětšení degradace koksu a snížení výroby. Proto při injektáži náhradních paliv je důležité, aby rychlost této reakce (reaktivita koksu) byla co nejmenší. Tato situace si vyžádala zavedení nové zkoušky jakosti koksu, která by hodnotila pevnost a reaktivitu koksu při vysoké teplotě a v atmosféře obsahující C.

Index reaktivity koksu, CRI je procentuální ztráta hmotnosti koksu po reakci s oxidem uhličitým na oxid uhelnatý za podmínek uvedených v mezinárodní normě.

Pevnost koksu po reakci, CSR je pevnost koksu po reakci s oxidem uhličitým v testu CRI, měřeno jako procento zadrženého koksu v sítu buď 10 mm nebo 9,5 mm za podmínek uvedených v mezinárodní normě.

Pro úspěšné řízení vysokopecního pochodu jsou nutné objektivní informace o kvalitě, které umožní prognózu na jeho chování v peci a dopadů na celkové výsledky. Velmi nadějným se v tomto směru jeví japonský komplexní kvalitativní parametr CSR, který charakterizuje očekávanou degradaci koksu v důsledku oxidační reakce uhlíku koksu s  $\text{CO}_2$  a působení vysokých teplot. Uvedený parametr umožní zpřesnění již vypracovaného algoritmu degradace koksu ve vysoké peci.



Hlavní částí zkušebního zařízení je trubka o vnějším průměru 76 mm a délce 650 mm, ve kterém je umístěn zkoušený vzorek koksu. Trubka má tloušťku stěny 4 mm a je vyrobena ze speciální korozivzdorné oceli. Reakční trubka je umístěna v elektrické peci s patřičnou regulací. Vstupní potrubí  $\text{CO}_2$  je přivedeno pod soustavu kruhových roštů, které zajišťují rovnoměrné rozdělení plynového proudu po průřezu trubky. Druhá příruba reakční trubice je opatřena potrubím pro odvod reakčních zplodin.

K zařízení patří ještě rotační buben na zjišťování pevnostních parametrů koksu o průměru 700 mm šířce 130 mm. Otěrová zkouška po reakci s  $\text{CO}_2$  se vyhodnocuje na síťovém třídíči, kde se vzorek rozdělí podle zrnitosti nad a pod 10 mm.

Postup vlastní zkoušky :

Vzorek zkoušeného koksu se drcením upraví na zrnitost 19 až 22,4 mm. Takto upravený vzorek o hmotnosti 200 g předběžně vysušený při teplotě  $160^\circ\text{C}$  se umístí do reakční trubky na usměrňovací rošt. Do středu vzorku se umístí termočlánek v ochranné trubici. Reakční trubice se umístí do elektrické pece a proplachuje se dusíkem, pokud teplota vzorku nedosáhne  $1100^\circ\text{C}$ . Po dosažení této teploty se po dobu dvou hodin vzorek promývá čistým  $\text{CO}_2$ . Po skončení pokusu se znovu zjišťuje hmotnost vzorku.

Celý zbytek koksu po skončení reakce s  $\text{CO}_2$  se vloží do otěrového bubnu. Rychlostí 20 otáček za minutu se buben stáčí a vzorek je namáhán celkem 600 otáčkami. Obsah bubnu se potom rozděluje na síťovém třídíči na frakci pod a nad 10 mm. [4]

Výpočet indexu reaktivity koksu – CRI

$$\text{CRI} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

$m_1$  - hmotnost koksu před reakcí (200 g)

$m_2$  - hmotnost koksu po reakci (g)

$m_3$  - hmotnost části koksu o zrnitosti větší než 10 mm po bubnové zkoušce



Obrázek č.4 – Zařízení ke stanovení indexu reaktivity koksu (CRI)

Výpočet indexu pevnosti koksu po reakci s  $\text{CO}_2$  – CSR

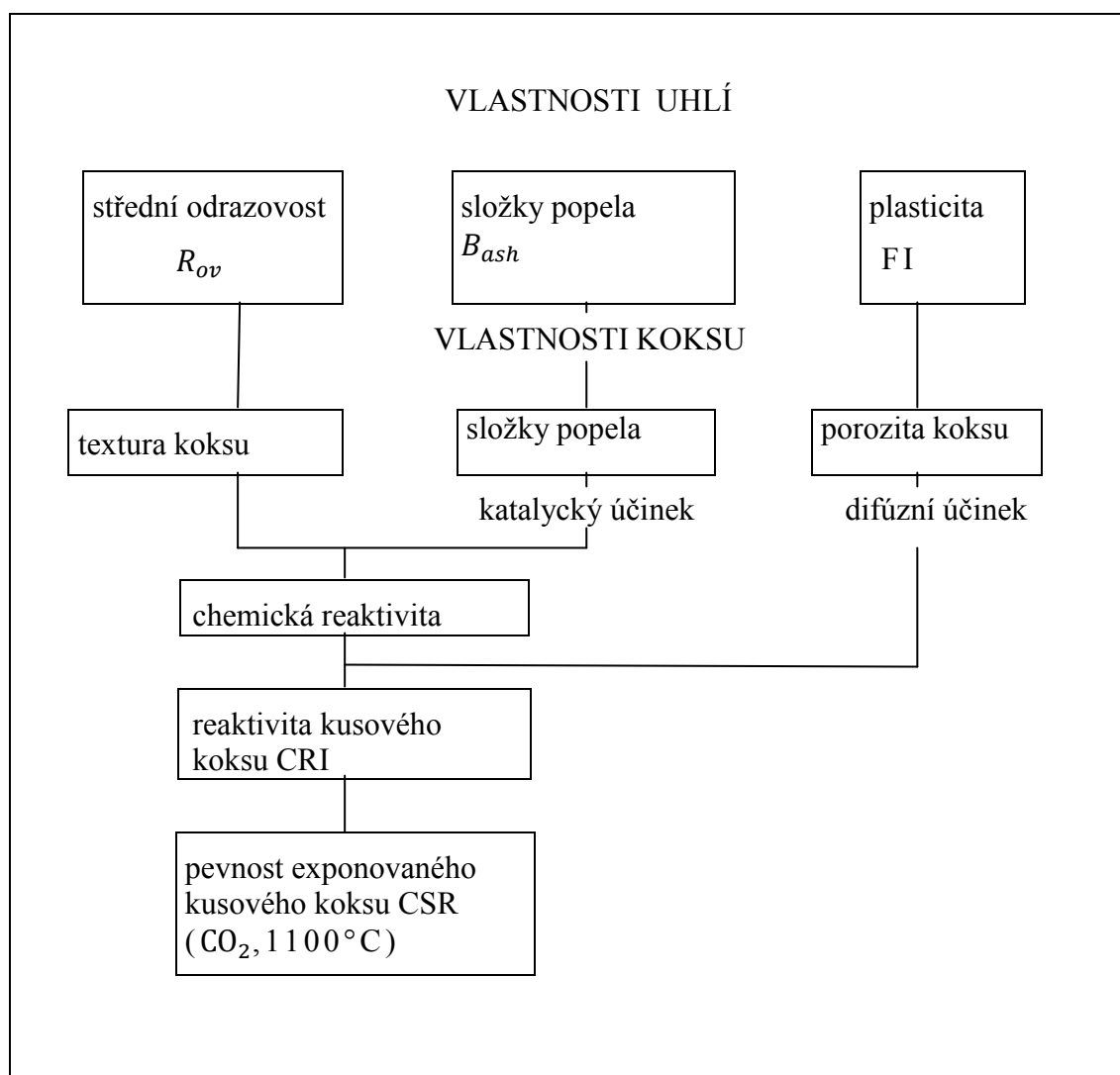
$$\text{CSR} = \frac{m_3}{m_2} \cdot 100 \quad [\%]$$

Každé měření se provádí vždy dvakrát, výsledkem je aritmetický průměr obou měření.

Hodnocení jakosti vysokopecního koksu v českých podmínkách (dle literárních údajů):

CSR < 55 %	- nízká kvalita vysokopecního koksu
CSR 55 – 60 %	- střední kvalita vysokopecního koksu
CSR > 60 %	- vysoká kvalita vysokopecního koksu

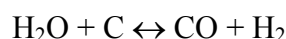
Schéma č. 4 – Hodnocení kusového koksu po termochemickém zatížení ( $\text{CO}_2, 1100^\circ\text{C}$ )



Střední světelná odraznost vitrinitu uhlí  $R_{ov}$  předurčuje parametry optické textury koksu a plasticita uhlí FI ovlivňuje rozhodujícím způsobem pórezní texturu koksu. Katalytický účinek bazických složek popelovin v uhlí (a koksu)  $B_{ash}$  ovlivňuje chemickou reaktivitu koksu při reakci s oxidem uhličitým, zatímco difúzní účinek makropórézního systému koksu rozhoduje o reaktivitě kusového koksu CRI.

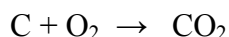
Pevnost termochemicky exponovaného (parciálně zplyněného) kusového koksu CSR se celosvětově stala významným kritériem pro hodnocení kvality vysokopecního koksu. [5]

Reaktivnost koksu je jeho schopnost redukovat kyslíčník uhličitý nebo vodní páru na kyslíčník uhelnatý podle rovnic :



V hutnictví se rozumí pod pojmem reaktivnost koksu redukce  $\text{CO}_2$  na CO podle první rovnice.

Spalitelnost koksu rozumíme oxidační schopnost koksu kyslíkem při hoření na  $\text{CO}_2$  podle rovnice :



Reaktivnost koksu se zakládá na oxidaci koksu v prostředí  $\text{CO}_2$ , spalitelnost na hoření koksu v prostředí vzduchu. Obě tyto vlastnosti koksu, reaktivnost a spalitelnost ve skutečnosti spolu vzájemně souvisí, tj. se stoupající reaktivností stoupá i spalitelnost a naopak.

U reaktivnosti sledujeme chemické a fyzikální vlivy na reaktivnost koksu, jako je obsah prchavé hořlaviny, složení popela, poměr amorfního uhlíku a grafitu, povrchu koksu, adsorpční schopnosti koksu, krystalografické struktury, vliv katalyzátorů atd. Bylo zjištěno, že různé modifikace uhlíku reagují různě s  $\text{CO}_2$  a kyslíkem a že na reaktivnost má vliv velikost koksu. Čím drobnější koks, tím větší je jeho povrch, a tím vyšší je reaktivnost. Rovněž druh uhlí má vliv na reaktivnost koksu. Koks vyrobený z koksových a žírých uhlí je méně reaktivní než koks pocházející z plynových uhlí.

### Skutečná, zdánlivá sypná hustota a pórovitost koksu

Skutečná měrná hmotnost koksu je poměr hmotnosti koksu k jeho skutečnému objemu, tedy k objemu koksové hmoty samé bez pórů. Vyjadřuje se v g/ml.

Závisí na obsahu popela a na konečné teplotě koksování. S vyšší teplotou koksování vzrůstá. U našich metalurgických koksů se pohybuje zpravidla v rozmezí 1,8 až 1,92 g/ml.

Zdánlivá hustota koksu je poměr hmotnosti koksu ke zdánlivému objemu koksu, tedy k objemu včetně pórů. Zjišťuje se laboratorně, podstata zkoušky je, že se zdánlivý objem stanoví z objemu vody vytlačené koksem. Používá se k tomu asi 2 kg vzorku koksu na vzduchu proschlého a přesně zváženého, velikosti ok 30 až 40 mm, průměru 150 mm a výšky 250 mm. Košíček s koksem se ponoří do skleněného válce naplněného vodou, při čemž se přetokovou trubičkou vytlačí objem vody, odpovídající zdánlivému objemu koksu včetně objemu košíčku.

Po zvážení vytlačené vody, jejím přepočtení na objem při teplotě měření a odečtení objemu košíčku se vypočte zdánlivě měrná váha  $S_2$  ze vztahu :

$$S_2 = \frac{m}{V} \text{ (g/ml)}$$

kde je  $m$  - váha proschlého vzorku v g,

$V$  – objem vody vytlačeného koksem v ml.

Zdánlivá hustota závisí na množství a velikosti pórů v koksu. U našich hutnických koksů bývá většinou 1,1 až 1,17 g/ml. Sypná hustota se používá nejčastěji a je daná poměrem hmotnosti k objemu včetně mezer mezi zrny. Vysokopecního koksu bývá 0,45 – 0,5 kg/m<sup>3</sup>.

Pórovitost koksu je poměr objemu všech pórů ke zdánlivému objemu koksu a udává se v procentech. Vypočte se ze skutečné a zdánlivé měrné váhy ze vztahu :

$$P = \frac{S_1 - S_2}{S_1} * 100 \text{ ( v \% )}$$

kde je P - pórovitost koksu v %,

$S_1$  - skutečná měrná váha v g/ml,

$S_2$  - zdánlivá měrná váha v g/ml.

U našich vysokopecních koksů je průměrná pórovitost koksu asi 45%, u slévarenského koksu vyrobeného za pýchovaného provozu v průměru asi 40 %.[2]

Pro hodnocení texturních vlastností koksu je užitečné vyjít z pohledu na uhlí jako na heterogenní látku o vysoké relativní molekulární hmotnosti. Koks, který je hlavním produktem tepelného rozkladu uhlí přejímá do určité míry některé texturní a povrchové vlastnosti prekursoru. Tyto vstupní znaky jsou v koksotvorném procesu vstupní materiálovou konstantou.[7]

Tabulka č.3 *Distribuce velikosti povrchu u vzorku černého uhlí*

velikost pórů Å	plocha povrchu [ $m^2.g^{-1}$ ]
< 12	156
12 - 300	26
> 300	1

Tabulka č. 4 - Rozdělení pórů v koksu do tříd s udáním techniky stanovení a komentářem

Třída pórů	poloměr	technika stanovení	poznámka
mikropóry	1,6	Proměření adsorpční izotermy $\text{CO}_2$ při $T = 298 \text{ K}$ se stanoví povrch $S_{\text{micro}}$ a objem $V_{\text{micro}}$	Mikropóry se uplatňují při sorpčních procesech. Podílejí se cca 95 % na vnitřním povrchu (koksu).
mezopóry (přechodové pory)	1,6 - 30	Stanovení objemu i distribuce vysokotlakou Hg-porozimetrií.	Mezopóry se již uplatňují při kapilární kondenzaci a difúzi plynů v koksu.
makropóry	30 - 7500	Stanovení objemu i distribuce vysokotlakou Hg-porozimetrií.	Makropóry se uplatňují při difúzi reagujících plynů ( $\text{O}_2$ , $\text{CO}_2$ ) k vnitřnímu povrchu koksu.
hrubé póry	7500 - $10^{-6}$	Výpočet objemu hrubých pórů: odečteme objem mikropórů, mezopórů a makropórů od celkového objemu pórů $V_p$ . Stanovení poměru plošných ekvivalentů hrubých pórů a stěn koksu optickou mikroskopií nábrusů.	Hrubé póry se uplatňují rozhodujícím způsobem při difúzi reagujících plynů ( $\text{O}_2$ , $\text{CO}_2$ ) k vnitřnímu povrchu koksu, jejich podíl na celkovém objemu $V_p$ (65 – 80 %) je převažující.

### 3.3. Fyzikálně mechanické vlastnosti koksu

Při předběžném hodnocení koksu se posuzuje jeho barva, tvar, velikost a někdy i zvuk. Takové hodnocení je pouze předběžným odhadem jakosti koksu, přesto však se dá poznat je-li koks dobře vyzrálý, celistvý, dobře spečený, velkousý nebo drobný, popraskaný atd. Koks vyrobený z nevhodné uhelné směsi je nedozrálý bývá již na první pohled nevzhledný, černý a otírá se v ruce. Křehký nebo příliš popraskaný koks se rozpadá již při pádu z rukou na tvrdou podložku na několik kusů. Tvrdý a pevný koks má naproti tomu barvu šedou až stříbřitou, málo trhlin, kovový zvuk při nárazu jednoho kusu na druhý nebo na tvrdý předmět a při vhození na tvrdou podložku se nerozpadne.

Při technickém hodnocení z hlediska fyzikálně mechanického se stanoví zpravidla kusovitost koksu, stejnoměrnost a čistota třídění, sypná váha, mechanická pevnost a trhlinitost koksu.

Kusovitost a stejnoměrnost třídění – třídící zkouška

U slévarenského koksu je kladen důraz na větší kusovitost, u vysokopecního koksu mohou být kusy menší.

Velikost a třídění vysokopecního koksu působí na odpor, který klade vsázka vysoké pece procházejícím plynům. Příliš velké kusy koksu nejsou zvlášť výhodné, protože mají v poměru ke své váze malý povrch a hoří v peci pomalu. Příliš drobný koks způsobuje naproti tomu příliš velký odpor plynů ve vysoké peci. Proto se u vysokopecního koksu klade důraz na stejnoměrnou velikost koksu a dává se přednost koku, který je tříděn v úzkých mezích a v němž je rozpětí mezi nejmenšími a největšími kusy pokud možno malé.

Mechanická pevnost koksu

Mechanická pevnost koksu je odolnost koksu proti roztříštění a rozmělnění při různých nárazech na tvrdé předměty při nakládání, přesypech atd. Čím odolnější je koks proti mechanickým vlivům, tím lépe vyhovuje požadavkům pece. Pevnost koksu v otěru se provádí v bubnech různého provedení a konstrukce.



Nejběžněji používaným je buben MICUM pro zjišťování jednotlivých prosevů. Podíly jednotlivých tříd koksu se váží a vyjádří v procentech původního vzorku. Vysokopeční koks má mít vysokou výhřevnost a dobré mechanické vlastnosti, ze kterých se hodnotí hlavně otíravost. Kvalitní koks má mít při zkoušce MICUM hodnotu  $M_{10} < 8 \%$  a  $M_{40} > 80 \%$ . Nároky na pevnost koksu se zvyšujícím objemem vysokých pecí zvyšují. Zejména u slévárenského koksu jsou kladeny přísnější nároky na pevnost koksu.

### Zkouška MICUM

Pro zjišťování pevnosti a otěru koksu je dnes nejvíce rozšířena bubnová zkouška Micum. Ke zkoušce se používá buben ze železného plechu tloušťky nejméně 5 mm, vnitřního průměru i vnitřní délky 1000 mm. Buben má uzavíratelná dvířka a je poháněn elektromotorem a převodovou skříní tak, aby se otáčel rychlostí 25 ot/min. Buben má počítadlo se samočinným zastavením po 100 otáčkách.

Do bubnu se vkládá vzorek 50 kg koksu o zrnitosti nad 60 mm. Po uzavření dvířek se otáčí buben po dobu 4 minut, takže vykoná 100 otáček. Po zastavení bubnu se koks vyjme a třídí na sítích s kruhovými otvory 40 a 10 mm. Podíl jednotlivých zrn koksu se váží a vyjádří v procentech původního vzorku podle tohoto sestavení:

Procentuální podíl nad 40 mm ( $M_{40}$ ) udává pevnost koksu, podíl pod 10 mm ( $M_{10}$ ) udává otěr. Koks je pro vysoké pece tím vhodnější, čím vyšší je  $M_{40}$  a čím nižší je  $M_{10}$ . Pevnost u nás dosahovaná bývá 70 – 75 %. Otěr  $M_{10}$  nemá u dobrého koksu přesáhnout 9 %. Hodnoty zkoušky Micum jsou důležitou součástí předepsané jakosti vysokopečního koksu .

Při zkoušce otíravosti koksu v bubnu MICUM vzniká převážná část drobných podílů už během první minuty, což svědčí o malé pevnosti vystupujících částí kusu ve srovnání s jádrem, které je houževnatější.

K vyhodnocování změny kusovosti koksu během zkoušky MICUM se používá různých ukazatelů, z nichž nejznámější je Grafův ukazatel:

$$Gr = \frac{AD}{100L + \frac{3}{4}S}$$

Kde D je podíl kusů nad 60 mm před zkouškou [%],

A je podíl kusů nad 60 mm po zkoušce [%],

L je podíl kusů pod 10 mm po zkoušce [%],

S je podíl kusů 40 – 20 mm před zkouškou [%].

Přechodem na menší kusovost koksu pro vysoké pece ztrácí toto hodnocení význam a také zkouška MICUM by měla být přizpůsobena změně technologie výroby surového železa.

## 4. MODERNÍ METODY HODNOCENÍ JAKOSTNÍCH PARAMETRŮ UHLÍ

V laboratořích OKK Koksovný a.s. se provádějí mimo jiné i tyto následující zkoušky uhlí

- stanovení veškeré vody  $W^t$
- stanovení analytické vody  $W^a$
- stanovení prchavé hořlaviny  $V^{daf}$
- stanovení popela  $A^d$
- stanovení síry  $S^d$

#### 4.1.1. Stanovení veškeré vody

Zkouška se provádí podle normy ČSN 441375 (2009)

Vzorek pod 16 mm se umístí na podnos navážkou 500 g (tloušťka vrstvy 1-1,5 g/cm<sup>2</sup>).

Sušení se provádí při teplotě 165 ± 10 °C po dobu 45 (120 ) minut do konstantní hmotnosti. (doba sušení se počítá od okamžiku dosažení této teploty po vložení podnosu).

Po uplynutí doby sušení (tj. cca 2 hodiny) se vzorek rychle zváží a následuje kontrolní sušení po dobu 10 minut. Maximální rozdíl hmotnosti mezi dvěma sušeními je 0,2 % původní navážky (při 500 g = 1 g). Pro výpočet se používá nejnižší hmotnost.

$$W^t = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\%]$$

kde je  $m_1$  – hmotnost podnosu [g]

$m_2$  - hmotnost podnosu s koksem před vysoušením [g]

$m_3$  - hmotnost podnosu s koksem po vysušení [g]

#### 4.1.2. Stanovení analytické vody

Vzorek zrnění pod 0,2 mm s navážkou 1 g ±0,0001 g dáme do váženek, kde je tloušťka vrstvy 0,15 g/cm<sup>2</sup>. Sušení se provádí při teplotě 105 °C po dobu 45 minut do konstantní hmotnosti, dále následuje chlazení na vzduchu po dobu 5 minut na teplotu místnosti.

Kontrolní sušení se provádí po dobu 20 minut, následuje vážení, kdy rozdíl mezi dvěma váženími je menší než 0,001 g. Váženky jsou pak s navážkou v sušárně odkryty, při ochlazování a vážení zakryty. Všechna vážení jsou prováděna s přesností 0,0001 g.

$$W^a = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\%]$$

kde je  $m_1$  – hmotnost váženky s víčkem [g]

$m_2$  - hmotnost váž. s víčkem a navážkou před vysoušením [g]

$m_3$  - hmotnost podnosu s koksem po vysušení [g]

### 4.1.3. Stanovení prchavé hořlaviny

Provádí se podle normy ČSN 44 1366 (2011)

Analytický vzorek se zrněním pod 0,2 mm a navážkou  $1 \pm 0,01$  g s přesností 0,0001 g se dá do kelímku. (+ 2 až 3 kapky n-hexanu u koksu). Zakryté kelímky s podstavcem se umístí do muflonové pece vyhřáté na  $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Prázdné otvory v podstavci se vyplní prázdnými kelímky. Vzestupná teplota v peci na  $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$  za 3 až 4 minuty. Pak se kelímky žíhají 7 minut, přičemž teploty  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  musí být dosaženo do 4 minut. Po vyjmutí z pece se dále ochlazují 5 minut na vzduchu na kovové (keramické) podložce. Dále pak v exsikátoru na teplotu místnosti.

Stanovení se provádí ze dvou navážek téhož vzorku :

$$V^{daf} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 - W^a$$

kde je  $m_1$  – hmotnost prázdného kelímku s víčkem [g]

$m_2$  - hmotnost kelímku s víčkem a navážkou [g]

$m_3$  - hmotnost kelímku s víčkem a neprch. zbytkem po zahřívání [g]

#### 4.1.4. Stanovení popela

Provádí se podle normy ČSN 44 1378 (2011)

Vzorek se zahřívá na vzduchu na teplotu  $815 \pm 10$  °C specifikovanou rychlostí a při této teplotě se udržuje do konstantní hmotnosti. Obsah popela se vypočítá z hmotnosti zbytku po spálení. Pro stanovení popela se používá analytický vzorek uhlí nebo koksu pro obecný rozbor (umletý, aby prošel sítím s otvory 0,212 mm). Po skončení doby žíhání se miska vyjme z pece a 10 minut se ochlazuje. Poté se miska přemístí do exsikátoru nebo jiné uzavřené nádoby bez vysoušedla a nechá se ochladit na teplotu místnosti. Ochlazená miska se zváží na nejbližší 0,1 mg.

$$A^d = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\%]$$

kde je  $m_1$  – hmotnost prázdné misky [g]

$m_2$  - hmotnost misky s navážkou [g]

$m_3$  - hmotnost misky s vyžih. popelem do stálé hmotnosti [g]

Výsledky stanovení se zaokrouhlí na dvě desetinná místa, konečný výsledek na jedno desetinné místo.

K moderním metodám k stanovení obsahu popela patří měření pomocí termogravimetrického analyzátoru. TGA měří změnu hmotnosti vzorku v závislosti na rostoucí teplotě v kontrolované atmosféře. Rozsah měřících teplot je zvýšen do 1000 °C a má novou řídicí jednotku, která umožňuje rychlejší přemístění pozic kelímku a tím taky i zrychlení analýzy. Používá se pro navážky hodnoty od 0,5 – 5 gramů, současně lze měřit až 19 vzorků s možností propojení a současného řízení dvou pecí.



Obrázek č. 5 – Termogravimetrický analyzátor TGA

#### 4.1.5. Stanovení síry

Provádí se podle normy ČSN 44 1395 (2009)

Provádělo se dříve vážkově, nyní se používá ke stanovení přístroje LECO SC – 132. Analytický vzorek s navázkou 0,25 g se spálí v atmosféře čistého kyslíku, která je zabezpečena dvěma způsoby :

- proplachovací proud kyslíku kolem čela spalovací zóny funguje jako clona před vnější atmosférou.
  - druhý způsob proudění kyslíku začíná až v okamžiku, kdy je hlavní objem vzorku spálen. Kyslík je přiveden nad vzorek, aby došlo k dospálení vzorku.
- Uvolněné plyny jsou odtaženy čerpadly na infračervený detekční systém, který vyhodnotí obsah síry.(max. 0,65 %  $S^d$ )



Obrázek č. 6 – Přístroj LECO SC 132

## **5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **5.1. Statistické zpracování vlivu vlastností uhlí na kvalitu koksu v provozních podmínkách OKK**

Experimentální část byla zaměřena na sledování kvalitativních parametrů uhlí a koksu. Data byla shromažďována v období 1.4.-15.11.2012 z provozu laboratoře Koksovna Svoboda.

Pro kvalitu vysokopecního koksu byly použity výsledky mezinárodní zkoušky NSC (CSR/CRI), u uhlí pak byly zvoleny kvalitativními parametry obsah popela a obsah prchavých látek.

Pro kvalitu slévarenského koksu byla rozhodujícím faktorem pro určení kvality koksu bubnová zkouška MICUM a pro kvalitativní parametry uhlí pak obsah prchavých látek.

### **5.1. Statistické zpracování hodnot vysokopecního koksu**

Pro statistickou analýzu uhlí bylo použito pěti druhů uhlí označeného A, B, C, D a E, které tvořily dva druhy vsázky. První se skládala ze čtyř komponentů A, B, C, D a je ve vstupních hodnotách analýzy vysokopecního koksu pod pořadovými čísly 1.-21. Druhá vsázka pak měla komponenty tři: D, A, E, které mají pořadové čísla 22.-57. Jedná se o druhy uhlí, které bývají běžně používány pro výrobu vysokopecního koksu.

Při statistickém zpracování byl u vysokopecního koksu porovnáván jako charakteristický parametr kvality koksu parametr CSR, pro kvalitativní parametry uhlí pak obsah popela a obsah prchavých látek.



Tabulka č. 5 - Použité hodnoty pro zpracování analýzy ve Statgraphic

datum	pořadové číslo	A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	CRI	CSR
	1.	8,86	0,61		
	2.	8,71	0,49		
17.9.2012	3.	9,55	0,70	35,70	56,83
	4.	8,76	1,09		
	5.	10,21	0,52		
18.9.2012	6.	7,04	0,90	35,12	54,65
	7.	11,73	0,66		
	8.	13,58	0,50		
19.9.2012	9.	12,53	0,87	34,85	53,83
	10.	13,05	0,33		
	11.	9,30	1,17		
20.9.2012	12.	9,45	0,60	32,02	60,84
	13.	9,76	0,39		
	14.	10,25	0,90		
21.9.2012	15.	9,52	1,06	33,53	58,26
	16.	9,18	1,06		
	17.	9,46	0,56		
22.9.2012	18.	9,41	0,97	31,65	61,07
	19.	9,27	1,48		
	20.	10,13	0,45		
23.9.2012	21.	9,54	0,74	33,04	59,09
	22.	8,8	0,45		
	23.	8,2	0,87		
3.11.2012	24.	8,5	0,44	35,51	60,67
	25.	8,4	0,55		
	26.	9,3	0,66		
4.11.2012	27.	9,4	0,55	33,84	62,16
	28.	8,9	0,66		
	29.	9,0	0,44		

Jaroslav Bochňák : Závislost vysokoteplotních parametrů koksu na složení uhelné vsázky

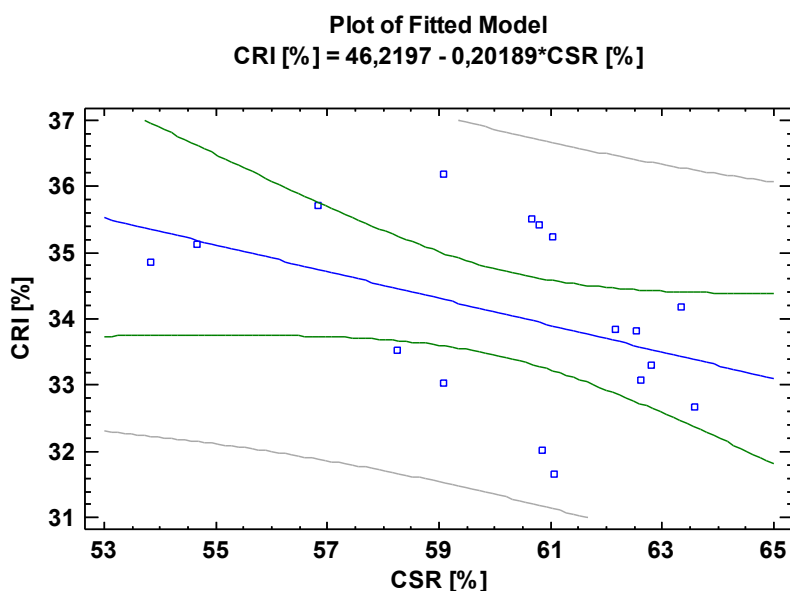
		A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	CRI	CSR
5.11.2012	30.	9,0	0,54	35,24	61,05
	31.	7,9	0,33		
6.11.2012	32.	8,0	0,54	35,41	60,79
	33.	8,5	0,47		
	34.	8,1	0,46		
7.11.2012	35.	8,0	0,43	34,19	63,33
	36.	8,5	0,87		
	37.	8,1	0,44		
8.11.2012	38.	8,1	0,33	33,30	62,81
	39.	8,1	0,44		
	40.	8,3	0,65		
9.11.2012	41.	7,8	0,76	33,08	62,63
	42.	7,7	0,43		
	43.	8,0	0,43		
10.11.2012	44.	8,2	0,76	32,67	63,57
	45.	8,4	0,55		
	46.	8,8	0,44		
11.11.2012	47.	8,8	1,10	33,83	62,55
	48.	8,2	0,98		
	49.	8,3	0,44		
12.11.2012	50.	9,7	0,22	36,18	59,08
	51.	9,8	0,44		
	52.	9,0	0,99		
13.11.2012	53.	8,8	0,33		
	54.	8,5	0,44		
	55.	8,8	0,77		
14.11.2012	56.	8,7	0,44		
	57.	8,9	0,55		

## 5.2. Výsledky jednoduché lineární regrese uhlí a koksu VK

### 5.2.1. Lineární regrese CRI na CSR

Pro vstupní parametry koksu byly použity hodnoty indexu reaktivity koksu (CRI) a pevnosti koksu po reakci (CSR). Jednoduchá lineární regrese nevykazovala statisticky významný vztah mezi hodnotami CRI [%] a CSR [%].

Graf č. 1 – Regresní závislost mezi parametry CRI a CSR



Korelační koeficient = -0,434122

$R^2 = 18,8462 \%$

$R^2$  (upravený pro modely s různými proměnnými) = 13,4359 %

Standartní chyba odhadu = 1,25533

Průměrná absolutní chyba = 0,982747

Grafický výstup ukazuje výsledky lineárního modelu mezi parametry CRI [%] a CSR [%].

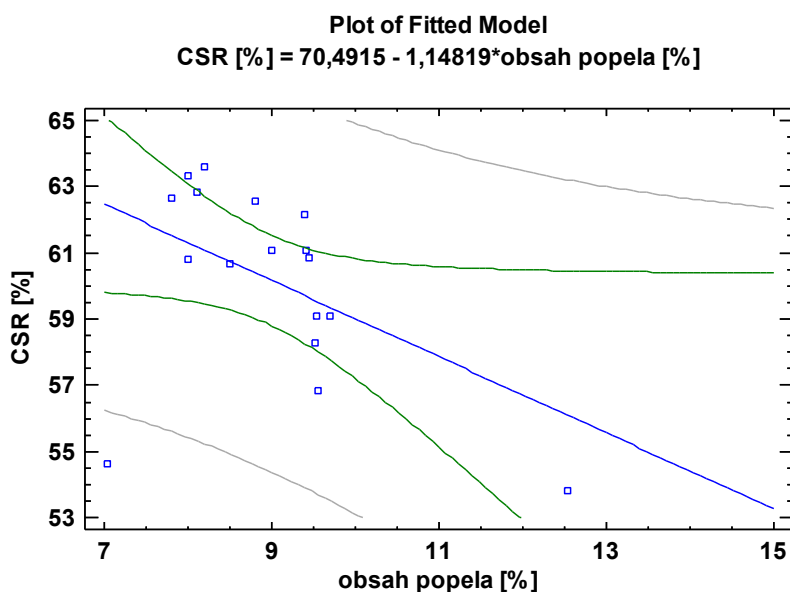
Rovnice vhodného modelu :  $\text{CRI} [\%] = 46,2197 - 0,20189 \cdot \text{CSR} [\%]$

Při hodnocení kvality vysokopecního koksu klademe důraz na co nejvyšší hodnoty parametru CSR a nízké hodnoty parametru CRI.

### 5.2.2. Lineární regrese CSR – obsah popela

Pro statistické posouzení pevnosti koksu CSR a obsahu popela  $A^d$  formou jednoduché lineární regrese.

Graf č. 2 – Regresní závislost mezi parametry CSR a obsahem popela



Korelační koeficient = -0,478145

$R^2 = 22,8623 \%$

$R^2$  (upravený pro modely s různými proměnnými) = 17,7197 %

Standartní chyba odhadu = 2,63169

Průměrná absolutní chyba = 1,80345

Grafický výstup ukazuje výsledky vhodného lineárního modelu mezi parametry CSR [%] a obsahu popela [%]. Rovnice vhodného modelu je :

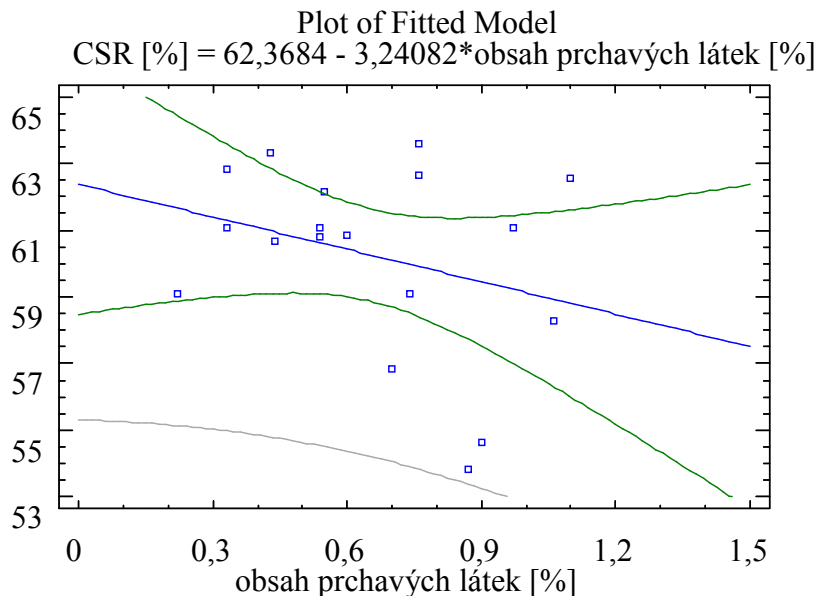
$$\text{CSR} [\%] = 70,4915 - 1,14819 \cdot \text{obsah popela} [\%]$$

U obsahu popela je záporná hodnota, měl by být tedy co v nejmenším obsahu, protože nám snižuje hodnotu pevnosti koksu po reakci s  $\text{CO}_2$  (CSR). Obsah popela v uhlí je nevíтанou složkou jak ze stanoviska energetického, nebo dalšího zpracování uhlí. V koksárenském vsázkovém uhlí přechází popel zcela do koksu, čímž se snižuje jeho použitelnost pro metalurgické účely.[2]

### 5.2.3. Lineární regrese CSR – obsah prchavých látek

Při statistickém posouzení, kde je kvalitativním parametrem označen obsah prchavých látek  $V^{\text{daf}}$  by měla platit stejná pravidla jako u obsahu popela a tedy čím nižší obsah tím vyšší pevnost koksu.

Graf č. 3 – Regresní závislost mezi parametry CSR a obsahem prchavých látek



Korelační koeficient = -0,28978

$R^2 = 8,39727 \%$

$R^2$  (upravený pro modely s různými proměnnými) = 2,29042 %

Standartní chyba odhadu = 2,86784

Grafický výstup ukazuje výsledky vhodného lineárního modelu mezi parametry CSR [%] a obsahu prchavých látek [%]. Rovnice vhodného modelu je :

$$\text{CSR [\%]} = 62,3684 - 3,24082 \cdot \text{obsah prchavých látek [\%]}$$

Obecně lze říct, že uhlí používaná pro výrobu koksu mají obsah prchavých látek od 18 – 35 %. Nejlepší uhlí koksové, má obsah 17 – 26 %. S postupným nárůstem prchavých látek ubývá koksovacích schopností jednotlivých uhlí a zhoršuje se jakost koksu.

### 5.3. Statistické zpracování hodnot slévárenského koksu

Tabulka č. 6 - Použité hodnoty pro zpracování analýzy ve Statgraphic II.

datum	pořadové číslo	$\gamma_{daf}$	M 40	M 10
	1.	0,80	86,8	10,0
	2.	0,91	85,2	12,6
1.4.2012	3.	1,31	85,2	13
	4.	0,72	85,4	12,2
	5.	1,20	86,6	10,4
2.4.2012	6.	1,05	85,0	11,8
	7.	1,35	85,4	10,6
	8.	0,89	85,8	10,6
3.4.2012.	9.	0,82	86,2	10,8
	10.	0,95	87,4	10,0
	11.	1,07	85,8	9,8
4.4.2012	12.	0,80	84,6	9,6
	13.	0,87	84,4	11,6
	14.	1,42	84,4	11,6
5.4.2012	15.	0,69	89,2	8,0
	16.	0,96	87,4	9,8
	17.	0,9	87,6	9,4
6.4.2012	18.	0,96	89,0	8,6
	19.	0,85	88,6	8,4
	20.	0,57	87,6	9,8
7.4.2012	21.	1,22	87,8	8,0
	22.	1,3	87,6	9,0
	23.	0,91	84,2	11,8
8.4.2012	24.	0,78	84,2	12,0
	25.	1,02	89,0	7,8
	26.	1,40	85,6	12,0
9.4.2012	27.	1,20	89,0	8,0
	28.	0,77	86,8	10,6
	29.	0,97	87,4	9,6
10.4.2012	30.	1,08	84,4	9,8
	31.	1,11	84,8	10,8
	32.	1,17	88,6	8,0
11.4.2012	33.	0,91	86,8	8,8

Jaroslav Bochňák : Závislost vysokoteplotních parametrů koksu na složení uhelné vsázky

datum	pořadové č.	$v_{daf}$	M 40	M 10
	34.	1,04	86,8	9,6
	35.	1,19	85,8	11,2
12.4.2012	36.	1,05	89,2	8,2
	37.	0,85	82,0	14,4
	38.	1,24	84,6	12,0
13.4.2012	39.	1,07	86,4	10,6
	40.	0,89	85,0	12,2
	41.	1,04	86,2	10,8
14.4.2012	42.	1,10	87,4	9,4
	43.	0,85	85,4	12,2
	44.	1,41	82,8	13,0
15.4.2012	45.	1,14	84,8	12,6
	46.	0,99	87,4	10,4
	47.	0,94	85,2	11,8
16.4.2012	48.	0,79	88,4	9,0
	49.	1,85	88,8	8,0
	50.	1,07	88,2	9,0
17.4.2012	51.	0,88	85,8	10,8
	52.	0,96	86,2	11,0
	53.	1,10	88,8	8,8
18.4.2012	54.	1,07	86,4	10,6
	55.	0,62	87,4	11,4
	56.	0,55	85,8	10,0
25.9.2012	57.	0,61	88,6	8,2
	58.	0,73	87,6	9,2
	59.	0,54	87,4	9,6
26.9.2012	60.	1,06	86,0	9,0
	61.	2,14	85,8	10,4
	62.	0,72	86,6	10,4
27.9.2012	63.	0,6	86,0	10,6
	64.	0,73	88,6	8,2
	65.	0,59	88,0	9,0
28.9.2012	66.	0,69	88,2	8,6
	67.	0,59	87,0	9,6
	68.	0,85	87,0	10,0



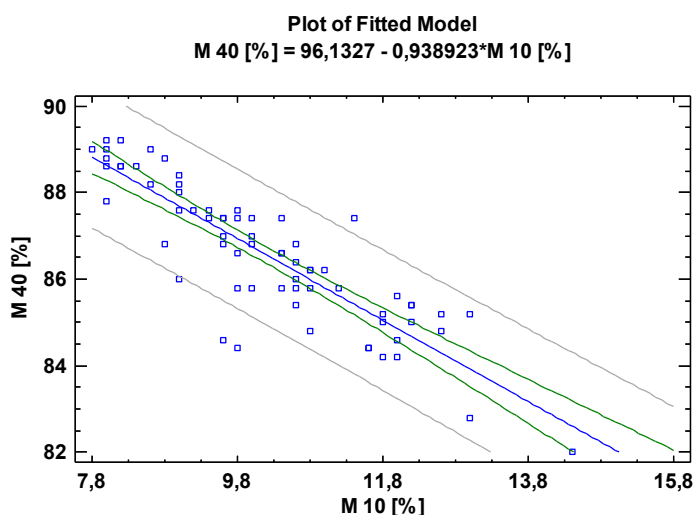
Pro statistické zpracování slévárenského koksu byl použit parametr otěrové pevnosti koksu M 40 a podílu otěru M 10, pro kvalitativní parametry uhlí pak parametr obsahu prchavé hořlaviny. Hodnoty analýzy jsou ze dvou druhů vsázek dlouhodobě sledovaných. První vsázka má poř.číslo 1-54 a je tvořena šesti druhy komponentů a ostřídla, druhá vsázka má pořadové číslo 55-68 a skládá se z pěti komponentů a ostřídla.

## 5.4. Výsledky jednoduché lineární regrese uhlí a koksu SLK

### 5.4.1. Lineární regrese M 40 na M 10

Jako první byly posuzovány statistické vztahy mezi výstupními parametry kvality slévárenského koksu parametr procentuálního podílu nad 40 mm, který nazýváme otěrovou pevností koksu a značíme M 40 a dále pak procentuálního podílu pod 10 mm označovaného jako otěr.

Graf č. 4 – Regresní závislost mezi parametry M 40 a M 10



Korelační koeficient = -0,870692

$R^2 = 75,8104 \%$

$R^2$  (upravený pro modely s různými proměnnými) = 75,4439 %

Standartní chyba odhadu = 0,799883

Průměrná absolutní chyba = 0,591902

Durbin-Watsonova statistika = 1,43951 (P=0,0082)

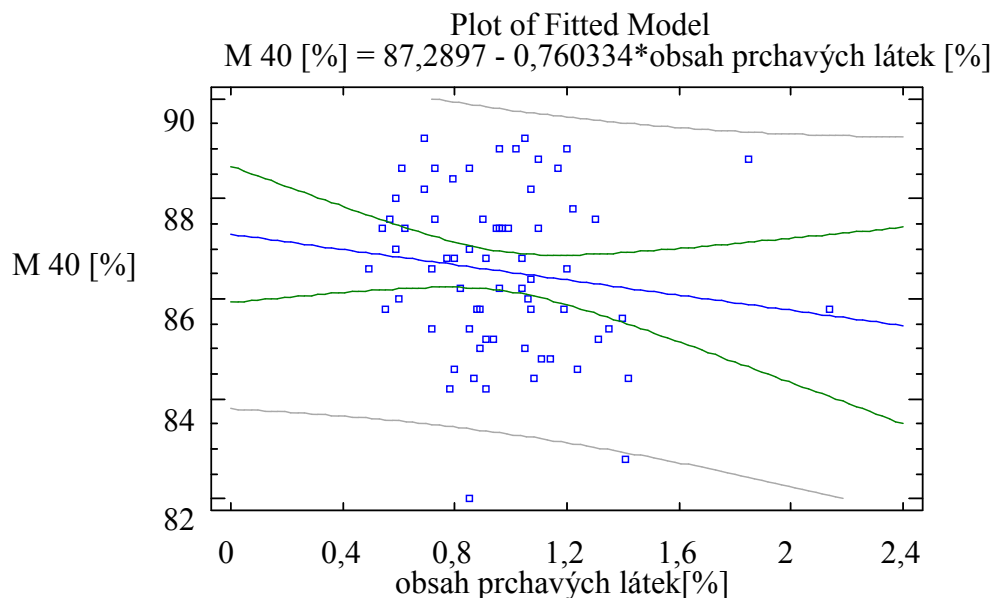
Grafický výstup ukazuje výsledky vhodného lineárního modelu mezi parametry M 40 [%] a M 10 [%]. Rovnice vhodného modelu je :

$$M\ 40\ [\%] = 96,1327 - 0,938923 * M\ 10$$
Vzhledem k tomu, P-hodnota v tabulce ANOVA je menší než 0,05, je statisticky významný vztah mezi M 40 [%] a M 10 [%] v 95,0% spolehlivosti. Ideální ořetrová pevnost M 40 by měla dosahovat 100 procentní podíl nad 40 mm, což je nereálné.

#### **5.4.2. Lineární regrese M 40 – obsah prchavých látek**

Pro hodnocení kvalitativního parametru uhlí u slévárenského koksu byl při analýze uveden parametr obsahu prchavých látek, jehož nízký obsah má důležitou roli na celkovou pevnost koksu.

Graf č. 5 – Regresní závislost mezi parametry M 40 a obsahem prchavých látek



Korelační koeficient = -0,137413

$R^2 = 1,88823 \%$

$R^2$  (upravený pro modely s různými proměnnými) = 0,401688 %

Standartní chyba odhadu = 1,61092

Průměrná absolutní chyb = 1,29846

Durbin-Watsonova statistika = 1,70605 (P=0,1079)

Grafický výstup ukazuje výsledky vhodného lineárního modelu mezi parametry M 40 [%] a obsahem prchavých látek. Rovnice vhodného modelu je :

$$M\ 40\ [\%] = 87,2897 - 0,760334 * \text{obsah prchavých látek} [\%]$$

Záporná hodnota u obsahu prchavých látek potvrzuje domněnku, že tento parametr má nepříznivý vliv na celkovou pevnost koksu.

## 6. NÁVRH SLOŽENÍ UHELNÉ VSÁZKY PRO VÝROBU KOKSU

Každá uhelná vsázka se skládá z několika druhů komponentů a má svá specifika. Stanovení správného poměru míchání různých druhů a dokonalého promíchání je základní podmínkou výroby jakostního koksu. U slévárenského koksu jsou stanovena přísnější kritéria na kvalitu koksu, uhlí se míchá z více komponentů a do vsázky se přidává menší podíl koksového prachu tzv. ostřidla pro snížení rozpínavosti uhlí a plynatosti uhlí a vzniku kusovitějšího koksu. U vysokopecního koksu se ostřidlo do vsázky nemusí přidávat. V provozních podmínkách OKK s pýchovaným provozem je nutné při přípravě dovlhčovat vsázku vodou (10,5 – 12 %) a jednotlivé druhy uhlí předem společně pomlít v kladivových mlýnech (90 % pod 3 mm). Před dopravením uhelné vsázky do uhelných věží se vsázka homogenizuje v míchačkách uhlí. Protože zásoby dobře koksujiícího uhlí jsou omezené, míchají se různé druhy uhlí a tím se podstatně rozšiřuje množství suroviny pro výrobu koksu.

Zpracovávané suroviny v provozu Koksovna Svoboda na středisku uhelné služby :

- prané černé uhlí vhodné pro koksování
  - zrnitost 0 – 80 mm
  - obsah vody 6 – 12 %
  - obsah popela 4 – 9 %
  - obsah prchavé hořlaviny 18 – 35 %
  - ostřidlo 10 – 20 %

K návrhu uhelné vsázky pro výrobu koksu bylo použito dvou vsázek, kdy jedna je určena pro výrobu vysokopecního koksu a druhá pro výrobu slévárenského koksu.

## 6.1. Návrh uhelné vsázky – Vysokopecní koks

Na základě statistické analýzy byla navržena uhelná vsázka vhodná pro vysokopecní koks.

Uhelná vsázka je složena ze čtyř druhů uhlí v poměru :

A - 25 %

B - 15 %

C - 15 %

D - 45 %

Tabulka č. 7 - Typové rozboru uhlí 2012 – Vysokopecní koks část 1

Uhlí	Koksovací vlastnosti										
	Wt	$A^d$	$V^{daf}$	SI	a	b	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$S_d^t$	$P^d$
A	7,6	4,5	25,2	6	14	64	397	430	468	0,46	
B	5,9	9,7	31,3	6,5	9	95	390	419	460	0,46	
C	10,7	10,9	24	7	13	40	406	432	469	0,59	
D	9	6,4	25,2	6,5	10	93	398	430	471	0,55	

Tabulka č. 8 - Typové rozboru uhlí 2012 – Vysokopecní koks část 2

Uhlí	Typový rozbor						Macerál.rozbor						
	G	Ž	Kž	Ka	Kb	A	V	L	I	$R_o$	MKS	OS	[%]
A	9	53	30	7	1	0	55,4	5,4	39,2	1,11	434	VB	25
B	65	21	11	3	0	0	73,9	6	20,1	0,94	534	VC	15
C	7	65	28	0	0	0	61,7	1,8	36,5	1,08	433	VB	15
D	8	77	15	0	0	0	63,8	2,2	34	1,07	434	VB	45

Tabulka č. 9 - *Analytický rozbor uhelné vsázky – Vysokopecní koks*

Vsázka	Analytický rozbor - vsázka					Rozsev vsázky			
[%]	Wt	$A^d$	$V^d$	$V^{daf}$	SI	Hranatá síta (mm)			
	[%]					0-3,15	3,15-10	nad 10	SUMA
25, 15 , 15, 45						[%]			
A, B, C,D	10,4	7,11	24,37	26,24	6	93,6	6,4	0	100

Tabulka č. 10 - *Analytický rozbor – Vysokopecní koks*

Wt	5,8
$A^d$	10,2
$V^{daf}$	0,69
rozsev [%] pod 25	0,9
25 - 40	4,2
40 - 50	39,8
50 - 60	18,5
60 -80	27,6
80 - 90	7,8
90 - 100	5,8
➤ 100	4,4
nad 90	9,9
suma	100
balast	15,75
CRI	33,7
CSR	57,7

## 6.2. Návrh uhelné vsázky – Slévárenský koks

Na základě statistické analýzy byla navrhnutá uhelná vsázka vhodná pro slévárenský koks.

Uhelná vsázka je složena z pěti druhů uhlí a ostřidla v poměru :

A - 25 %

B - 25 %

C - 18 %

D - 5 %

E - 15 %

F - 12 %

Tabulka č. 11 - Typové rozboru uhlí 2012 – Slévárenský koks část 1

Uhlí	Koksovací vlastnosti										
	Wt	$A^d$	$V^{daf}$	SI	a	b	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$S_d^t$	$P^d$
A	7,8	11,9	20,9	7,5	15	27	418	443	478	0,61	
B	10,4	10,5	26,1	8	14	120	394	421	467	0,69	
C	7,9	6,3	25,8	4,5	11	42	406	428	465	0,5	
D	11,3	8,8	25,1	6	19	90	397	425	471	0,58	
E	8,0	6,8	31,4	6	12	45	398	421	459	0,65	
F	ostřidlo (koks.prach)										

Tabulka č.12 - *Typové rozboru uhlí 2012 – Slévárenský koks část 2*

Uhlí	Typový rozbor						Macerál.rozbor						
	G	Ž	Kž	Ka	Kb	A	V	L	I	$R_o$	MKS	OS	[%]
A	1	21	31	31	16	0	71,4	1,2	27,4	1,25	433	VB	25
B	15	74	11	0	0	0	84,2	2	13,8	1	435	VB	25
C	17	73	10	0	0	0	59,1	4,8	36,1	1	433	VB	18
D	7	79	14	0	0	0	74,1	1,3	24,6	1,01	534	VC	5
E	49	30	5	8	8	0	71,2	8,8	20,0	1,09	533	VD	15
F	ostřídlo (koks.prach.)												12

Tabulka č.13 - *Analytický rozbor uhelné vsázky – Slévárenský koks*

Vsázka	Analytický rozbor - vsázka					Rozsev vsázky			
[%]	Wt	$A^d$	$V^d$	$V^{daf}$	SI	Hranatá síta (mm)			
	[%]					0- 3,15	3,15- 10	nad 10	SUMA
25,25,18,5,15,12						[%]			
A,B,C,D,E,F	10,4	5,25	22,91	24,18	7,5	94,8	5,2	0,0	100



Tabulka č. 14 - *Analytický rozbor – Slévárenský koks*

Wt	1,94
$A^d$	10,29
$V^{daf}$	1,02
rozsev [%] < 100	4,22
0 - 10	0,4
10 - 80	0,8
80 - 100	2,41
100 - 150	20,7
150 - 200	31,4
200 - 250	24,7
280 - 300	14,27
➤ 100	96,3
suma	100
MICUM M80	78,99
M40	86,41
M10	10,36

## 7. ZÁVĚR

V teoretické části byla diplomová práce zaměřena na studium odborné literatury a vysvětlení hlavních poznatků související s přípravou uhelné vsázky, rozdělením koksu až po samotný proces koksování.

Vysokopecní koks je nejdražší palivo a jeho výroba významně přispívá ke znečišťování životního prostředí, je tedy v současné době velmi výrazná snaha o jeho náhradu koksu jiným palivem (zemní plyn, olej, prachové uhlí).

Požadavky na slévárenský koks jsou vyšší než u vysokopecního koksu, vyrábí se většinou v pecích s pěchovaným provozem, dosahuje se tím zvýšené pevnosti a měrné váhy koksu. Na rozdíl od vysokopecního koksu probíhá koksování při teplotách asi o 50 až 100°C . Dosáhne se tím vyžadované kusovitosti a celistvosti koksu, současně však vyššího procentuálního výtěžku slévárenského koksu z celkové výroby koksu.

Experimentální data pro diplomovou práci byla získána z provozu OKK, a.s. v období třetího čtvrtletí roku 2012 (pro vysokopecní koks) a v období druhého čtvrtletí 2012 (pro slévárenský koks)

Pro zhodnocení kvality vysokopecního koksu byly použity uhelné vsázky s různým počtem komponentů, které byly dlouhodobě sledované. Kvalita vysokopecního koksu byla hodnocena japonskou zkouškou NSC (Nippon Steel Corporation) pro určení pevnosti vysokopecního koksu po jeho reakci s  $\text{CO}_2$  (při vysokých teplotách) CSR. Současně se určuje hodnota reaktivity koksu CRI (coke reactivity index). Při výsledcích v programu Statgraphic metodou jednoduché lineární regrese nebyl zjištěn statisticky významný vztah mezi hodnotami CSR a CRI, což mohlo být způsobeno nedostatečným objemem vstupních dat nebo velkou rozdílností vsázek. U první vsázky tvořené čtyřmi komponenty uhlí byly zjištěny celkově nižší hodnoty pevnosti koksu po reakci CSR, kde byl výsledný koks jen na střední a někdy i nízké kvalitě, což jde vysvětlit překročenými hodnotami obsahu popela v uhlí u komponentů B a C už při základní analýze uhlí. Při druhé vsázce vysokopecního koksu byly komponenty B a C vyloučeny ze vsázky a vsázka se doplnila o nový komponent E.

Z výsledků je známé, že se výrazně snížil obsah popela v uhlí a výsledný koks vykazoval parametr pevnosti koksu po reakci CSR vysoké kvality. Z výsledku jde tedy jednoznačně usoudit, že popel je ve vsázce složkou nežádoucí.

Při posuzování kvality slévárenského koksu se postupovalo obdobným způsobem sledování dvou vsázek s různým počtem komponentů, kde jako kvalitativní parametry koksu byly vyjádřeny parametry procentuální ořetrové pevnosti koksu M 40 a zbytkového podílu pod 10 mm nazývaného jako ořet M 10. Při posuzování pevnosti slévárenského koksu je zřejmé, že s větším obsahem prchavých látek se bude zhoršovat jakost a tedy i pevnost koksu. Při statistickém posouzení v programu Statgraphic byl nalezen staticky významný vztah mezi ořetrovou pevností koksu M 40 a ořetem M 10. Při posouzení ořetrové pevnosti a obsahu prchavé hořlaviny u uhlí bylo zjištěno, že záporná hodnota koeficientu korelace u obsahu prchavých látek potvrzuje domněnku, že tento parametr má nepříznivý vliv na celkovou pevnost koksu. Z výsledků ořetrové pevnosti M 40 za dané období lze usoudit, že koks měl v tomto období velmi dobrou kvalitu při pevnostní zkoušce, zvýšené byly ale podíly ořetu pod 10 mm ve zkoušce M 10 a to s malými výkyvy za celé období. Z výsledku lze říct, že zvýšením komponentů z pěti na šest a tedy přidáním komponentu F do vsázky se výrazně nezměnila kvalita slévárenského koksu.

Jednotlivé jakostní parametry uhlí i koksu vykazují velmi vysokou variabilitu, byl použit jen omezený počet zkoumaných vzorků, a závislosti jakostních parametrů koksu na vlastnostech uhelné vsázky jsou pravděpodobně nelineární, vykazují zjištěné závislosti nízkou statistickou vazbu. Z tohoto důvodu je potřeba zjištěné závislosti brát jako orientační. Pro spolehlivé posouzení zkoumaných závislostí navrhuji dlouhodobý výzkum korelačních vztahů, mezi jednotlivými parametry a použití nelineárních regresních funkcí, případně neuronových sítí.

Pro další posouzení kvalitativních parametrů uhlí mohl být u vysokopecního koksu přidán parametr obsahu inertinitu, jehož nízký obsah zlepšuje kvalitu koksu a u slévárenského koksu pak parametr plasticity uhlí. Z výsledné statistické analýzy lze usoudit, že rozhodující vliv pro kvalitu koksu budou výsledné vstupní parametry uhlí neboli typové rozboru uhlí, podle jejichž parametrů (koksovací vlastnosti, typový rozbor, macerálový rozbor) už lze dopředu usoudit, který koks a v jaké kvalitě jsem schopen vyrobit.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KALOČ M., BROŽ L., KRET J.: *Hutnictví železa I.* Skripta VŠB-TU OSTRAVA, 1986
- [2] KOZINA A., PÍŠA M.: *Koksárenství.* SNTL Praha, 1958.
- [3] OKK Koksovny,a.s.: *Vyrábíme koks* [online]. 2011 [cit. 2011-08-11]. Dostupné na WWW : < <http://www.koksovny.cz/cs/vyrabime-koks>>
- [4] KRET J., BILÍK J., KRAYZEL R., POLÁČEK P.: *Moderní způsoby hodnocení vysokopecního koksu* .Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě,Řada hutnická.1991, roč. 37, č.2
- [5] ROUBÍČEK V., BUCHTELE J.: *Uhlí-zdroje,procesy,užití.*1. vyd. Ostrava, Montanex, 2002, ISBN 80-7225-063-9.
- [6] KUCKOVÁ A.,KUCKO L.: *Vybrané kapitoly z koksárenství.* ALFA Bratislava, 1982
- [7] ROUBÍČEK V., BUCHTELE J.: *Chemie uhlí a jeho využití.* Skripta VŠB-TU Ostrava, 1996, ISBN 80-7078-406-7.
- [8] LECO : *TGA701 Therogravimetric* [online].2011[cit. 2011-06-17]. Dostupné na WWW: < [http://www.leco.cz/cz/products/organic/tga\\_701/tga\\_701.htm](http://www.leco.cz/cz/products/organic/tga_701/tga_701.htm)>
- [9] KALOČ M. : *Koksárenské tabulky a diagramy.* Skripta VŠB-TU OSTRAVA, 1986
- [10] FROHLICHOVÁ M., KRET. J.: *Alkalies in Blast Turbace Process. In Sbornik,,4th International symposium of Croatian metallurgical society –SHMD 2000, Materiále and Metalurgy“* Opatija, Croatia, June 2000. str. 21.
- [11] KUCKOVÁ. A.: *The Influence of Type Composition of Coal Charge on Coke Quality.* Acta Metallurgica Slovaca. Vol. 14,2008, ISSN 1335-1532
- [12] KONSTANCIÁK A.: *The Selection of Coal Mixes for Production of Blast-Furnace Coke.* Acta Metallurgica Slovaca Conference, Vol. 1,2010, ISSN 1338-1660
- [13] BOCHŇÁK J.: *Příprava uhelné vsázky pro koksování.* Bakalářská práce, [online].2011[cit. 2011-07-04]. Dostupné na WWW : <http://hdl.handle.net/10084/86913>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- |              |   |
|--------------|---|
| Obrázek č. 1 | – Vysokopeční koks – OKK, a.s.                        |
| Obrázek č. 2 | – Slévárenský koks – OKK, a.s.                        |
| Obrázek č. 3 | – Otopový koks – OKK, a.s.                            |
| Obrázek č. 4 | – Zařízení ke stanovení indexu reaktivity koksu (CRI) |
| Obrázek č. 5 | – Termogravimetrický analyzátor TGA                   |
| Obrázek č. 6 | – Přístroj LECO SC 132                                |

## SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 -	<i>Označení uhlí podle indexu puchnutí</i>
Tabulka č. 2 -	<i>Charakteristické znaky druhů koksu</i>
Tabulka č. 3 -	<i>Distribuce velikosti povrchu u vzorku černého uhlí</i>
Tabulka č. 4 -	<i>Rozdělení pórů v koksu do tříd s udáním technik stanovení a komentářem</i>
Tabulka č. 5 -	<i>Použité hodnoty pro zpracování analýzy ve Statgraphicu</i>
Tabulka č. 6 -	<i>Použité hodnoty pro zpracování analýzy ve Statgraphicu II</i>
Tabulka č. 7 -	<i>Typové rozboru uhlí 2012 – Vysokopecní koks část. 1</i>
Tabulka č. 8 -	<i>Typové rozboru uhlí 2012 – Vysokopecní koks část. 2</i>
Tabulka č. 9 -	<i>Analytický rozbor uhelné vsázky – Vysokopecní koks</i>
Tabulka č. 10 -	<i>Analytický rozbor – Vysokopecní koks</i>
Tabulka č. 11 -	<i>Typové rozboru uhlí 2012 – Slévárenský koks část. 1</i>
Tabulka č. 12 -	<i>Typové rozboru uhlí 2012 – Slévárenský koks část. 2</i>
Tabulka č. 13 -	<i>Analytický rozbor uhelné vsázky – Slévárenský koks</i>
Tabulka č. 14 -	<i>Analytický rozbor – Slévárenský koks</i>

## SEZNAM POUŽITÝCH TECHNICKÝCH NOREM

- ČSN 44 1375 - Tuhá paliva – Stanovení celkového obsahu vody v uhlí  
Dat. účinnosti : 9.1.2009
- ČSN 44 1366 - Čené uhlí a koks – Stanovení prchavé hořlaviny  
Dat. účinnosti : 1.11.2011
- ČSN 44 1378 - Tuhá paliva – Stanovení popela  
Dat. účinnosti : 1.11.2011
- ČSN 44 1395 - Tuhá paliva – Stanovení síry metodou infračervené spektrometrie  
Dat. účinnosti : 1.1.2009
- ČSN 44 1327 - Černouhelný koks – Stanovení mechanické pevnosti zkouškou MICUM  
Dat. účinnosti : 9.1.1989
- NEN- ISO 18 894 - Coke- Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength  
after reaction (CSR)  
Dat. účinnosti 1.5.2006

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	- Uhelná vsázka VK I
Příloha č. 2	- Uhelná vsázka VK II
Příloha č. 3	- Rozbor koksu VK II
Příloha č. 4	- Uhelná vsázka SLK I
Příloha č. 5	- Uhelná vsázka SLK II
Příloha č. 6	- Rozbor koksu SLK II
Příloha č. 7	- Výsledné rozborů Vysokopecního koksu
Příloha č. 8	- Výsledné rozborů Slévárenského koksu



Macerálová analýza: objemová [%]				
Vzorek uhlí	A	B	C	D
Vitrinit	55,4	73,9	61,7	63,8
Liptinit	5,4	6,0	1,8	2,2
Inertinit	39,2	20,1	36,5	34,0

Typová analýza [%]				
Vzorek uhlí	A	B	C	D
.plynové uhlí G	9	65	7	8
žírné uhlí Ž	53	21	65	77
koks.-žírné Kž	30	11	28	15
koks. 1.sk. Ka	7	3	0	0
koks. 2.sk. Kb	1	0	0	0
antracit A	0	0	0	0

Základní analýza				
Vzorek uhlí	A	B	C	D
obsah vody Wt	7,6	5,9	10,7	9
popelnatost $A^d$	4,5	9,7	10,9	6,4
prch.hořl. $V^{daf}$	25,2	31,1	24	25,2
index puch. SI	6	6,5	7	6,5
kontrakce a [%]	14	9	13	10
dilatace b [%]	64	95	40	93
poč. měk. $t_1$ [°C]	397	390	406	398
max.plast. $t_2$ [°C]	430	419	432	430
tep. tuh. $t_3$ [°C]	468	460	469	471
síra $S_d^t$ [%]	0,46	0,81	0,59	0,59

Macerálová analýza: objemová [%]			
Vzorek uhlí	D	A	E
Vitrinit	58,8	52,5	64,5
Liptinit	2,1	4,7	7,8
Inertinit	39,1	42,8	27,7

Typová analýza [%]			
Vzorek uhlí	D	A	E
plynové uhlí G	6	12	67
žírné uhlí Ž	74	63	20
koks.-žírné KŽ	20	25	4
koks. 1.sk. Ka	0	0	4
koks. 2.sk. Kb	0	0	5
antracit A	0	0	0

Základní analýza			
Vzorek uhlí	D	A	E
obsah vody Wt [%]	8,4	9,2	9,7
popelnatost $A^d$ [%]	5,6	5,8	7,9
prch.hořl. $V^{daf}$ [%]	24,6	25,1	30,9
index puchnutí SI	7	6	6
kontrakce [%]	18	13	13
dilatace b [%]	69	56	63
počátek měknutí $t_1$ [°C]	400	399	390
max.plasticita $t_2$ [°C]	425	431	419
teplota tuhnutí $t_3$ [°C]	468	467	460
síra $S_d^t$ [%]	0,57	0,46	0,64

Wt	6,2
$A^d$	8,5
$V^{daf}$	0,56
rozsev [%] pod 25	0,9
25 - 40	11,5
40 - 50	28,0
50 - 60	27,3
60 - 80	28,3
80 - 90	4,8
90 - 100	1,6
➤ 100	0,7
nad 90	1,3
suma	100
balast	14,7
CRI	34,3
CSR	61,52

Příloha č. 3 – Rozbor koksu VK II (22 – 57)

Macerálová analýza: objemová [%]					
Vzorek uhlí	A	B	C	D	E
Vitrinit	76,2	85,2	53,4	44,3	65,8
Liptinit	3,4	1,2	4,5	7,4	6,8
Inertinit	20,4	13,6	42,1	48,3	27,4

Typová analýza [%]					
Vzorek u.	A	B	C	D	E
plynové u.	36	21	6	68	68
žírné uhlí	10	79	72	23	32
koks.-žírné	8	0	20	5	0
koks. 1 sk.	14	0	2	3	0
koks. 2 sk.	32	0	0	1	0
antracit	0	0	0	0	0

Základní analýza					
Vzorek u.	A	B	C	D	E
Wt [%]	13,4	7,4	14,0	4,9	2,6
$A^d$ [%]	9,6	7,8	6,9	8,2	6,6
$V^{daf}$ [%]	21,8	28,4	25,1	29,2	31,9
SI	11	8	5	3	4,5
a [%]	22	20	11	13	11
b [%]	421	182	89	17	164
$t_1$ [°C]	441	385	398	391	383
$t_2$ [°C]	443	417	426	426	414
$t_3$ [°C]	475	466	467	456	463
$S_d^t$ [%]	0,54	0,62	0,48	0,46	0,62

Macerálová analýza: objemová [%]						
Vzorek	A	B	C	D	E	F
Vitrinit	71,4	84,2	59,1	74,1	71,2	93,4
Liptinit	1,2	2,0	4,8	1,3	8,8	0,8
Inertinit	27,4	13,8	36,1	24,6	20,0	5,8

Typová analýza [%]						
Vzorek u.	A	B	C	D	E	F
plynové u.	1	15	17	7	49	9
žirné uhlí	21	74	73	79	30	82
koks.žirné	31	11	10	14	5	9
koks. 1 sk.	31	0	0	0	8	0
koks. 2 sk.	16	0	0	0	8	0
antracit	0	0	0	0	0	0

Základní analýza						
Vzorek u.	A	B	C	D	E	F
Wt [%]	7,8	10,4 *	7,9	11,3*	8	8,1
$A^d$ [%]	11,9	10,5 *	6,3	8,8*	6,8	7,1
$V^{daf}$ [%]	20,9	26,1	25,8	25,1	31,4	26,8
SI	7,5	8	4,5	6	6	9
a [%]	15	14	11	19	12	14
b [%]	27	120	42*	90	56*	219
$t_1$ [°C]	418	394	406	397	398	389
$t_2$ [°C]	443	421	428	425	421	412
$t_3$ [°C]	478	467	465	471	459	473
$S_d^t$ [%]	0,61	0,69	0,5	0,58	0,65	0,72

Wt	2,16
$A^d$	10,14
$V^{daf}$	0,76
rozsev [%] < 100	4,1
0 - 10	0,4
10 - 80	0,73
80 - 100	2,73
100 - 150	24,38
150 - 200	32,5
200 - 250	21,75
280 - 300	17,29
➤ 100	95,8
suma	100
MICUM M80	76,74
M40	86,97
M10	9,6

